

Zespół Szkół Technicznych im. J. i J. niadeckich w Grudzi dzu



Laboratorium Elektryczne . Pracownia Automatyki
i Robotyki (s.48)

Instrukcja Laboratoryjna: 5. BADANIE MASZYN PR DU STA/ EGO

Opracował mgr in . Marcin Jabłowski

Cel wiczenia

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

Program wiczenia

1 Wiadomości ogólne

1.1 Silnik bocznikowy i obcowzbudny

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

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

1.1.3 Rozruch silnika

1.1.4 Regulacja prędkości obrotowej silnika

1.1.5 Tyristorowe zespoły napędowe

1.2 Silnik szeregowy

1.2.1 Charakterystyka zewnętrzna $n=f(I)$

1.2.2 Charakterystyka momentu $M=f(I)$

1.2.3 Rozruch silnika

1.2.4 Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego

1.3 Prądnicza bocznikowa i obcowzbudna

1.3.1 Warunki wzbudzenia prądnic samowzbudnej

1.3.2 Charakterystyka zewnętrzna $U=f(I_t)$

2 Badania laboratoryjne

2.1 Badanie silnika obcowzbudnego

2.1.1 Dane znamionowe

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

2.1.3 Regulacja prędkości obrotowej poprzez zmianę strumienia magnesy ciego

2.1.4 Regulacja prędkości obrotowej przez włączenie rezystancji dodatkowej do obwodu twornika

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

2.2 Badanie prądnic obcowzbudnej

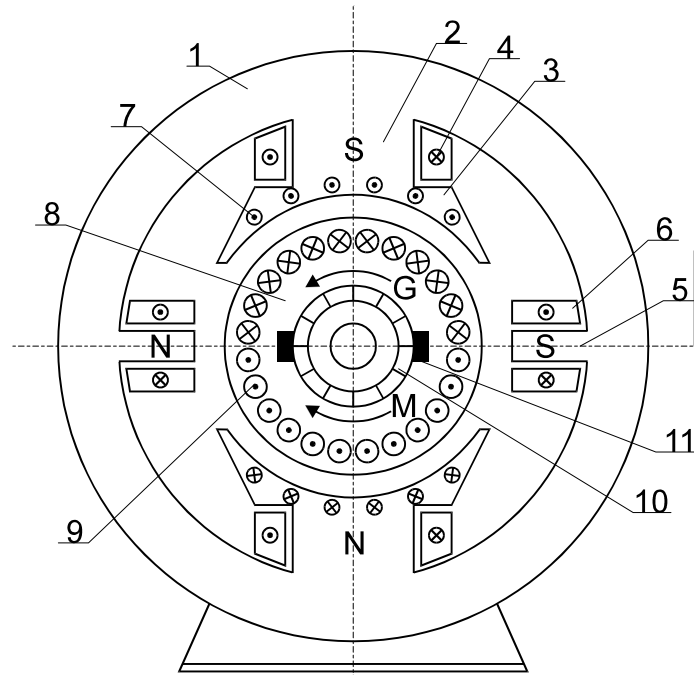
2.2.1 Dane znamionowe

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

3 Uwagi i wnioski

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 maszyn napędzających na energię elektryczną. Zjawisko przeciwdziałania momentu elektromagnetycznego momentowi maszyny napędzającej, jakiego występuje w prądnicach, można wykorzystać do elektrycznego hamowania.

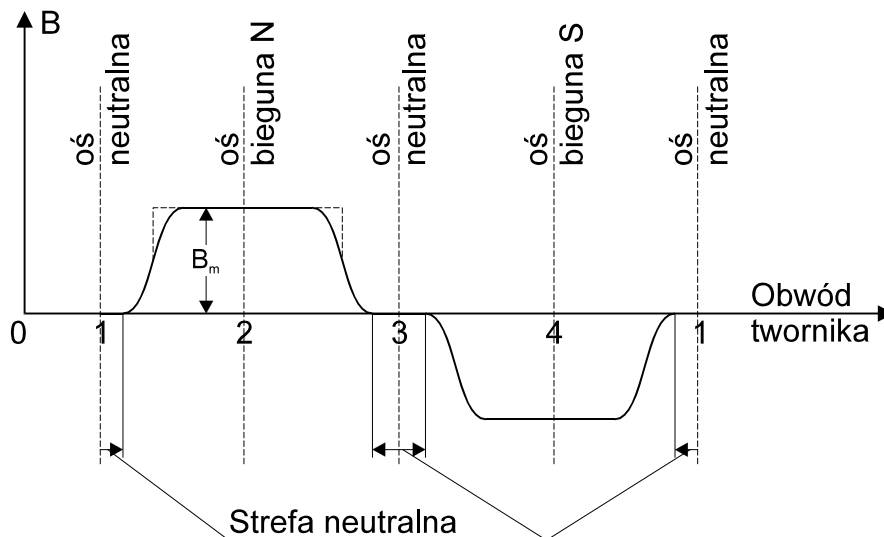


Rys.7.1. Komutatorowa maszyna prądu stałego

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

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

Na rys.7.1 został pokazany szkic maszyny prądu stałego. Uzwojenie wzbudzenia ma być w stojanie, a uzwojenie twornika jest ułożone w ścieżkach wirnika. Prąd stały płynący w uzwojeniu wzbudzenia wytwarza pole magnetyczne stałe względem stojana, a wirujące koło względem obracającego się wirnika. W wyniku oddziaływania tego pola na prąd twornika powstaje moment elektromagnetyczny. Pole wirujące koło charakteryzuje się tym, że oś pola wiruje z pewną prędkością względem elementu odniesienia (w tym przypadku wirnika) przy zachowaniu stałego zwrotu i stałej wartości względem tej osi. Rys.7.2 przedstawia rozkład pola magnetycznego względem rozwinętego obwodu twornika.

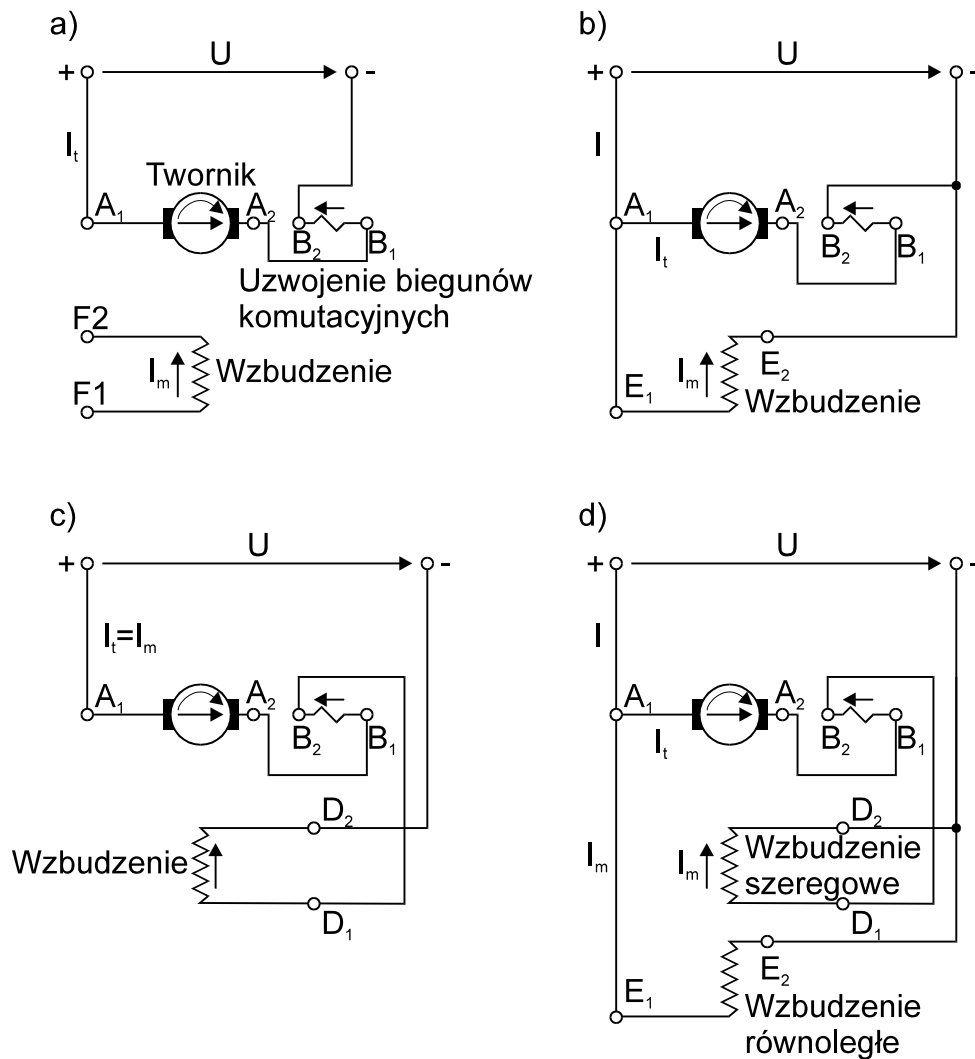


Rys.7.2. Obraz pola magnetycznego biegunów głównych na rozwini tym obwodzie maszyny

Pole to wiruje wzgl dem obwodu wirnika z pr dko ci $v=2\pi nr$ w kierunku przeciwnym do wirnika obracaj cego si z pr dko ci obrotow n (r - promie wirnika). Obraz pola magnetycznego z rys.7.2 dotyczy stanu ja cowego 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. Rozk ad indukcji magnetycznej wzd le obwodu twornika ulega zniekszta ceniu, a po cenie osi neutralnej przesuni cie. Zjawiska te nasilaj si wprost proporcjonalnie do warto ci pr du twornika. Powoduj one wyst powanie napi pmi dzy wycinkami komutatora, zmniejszenie indukowanej si e elektromotorycznej w obwodzie twornika oraz wp e waj niekorzystnie na przebieg komutacji, a tym samym na prac szczotek. Cz ciowe zmniejszenie skutków oddzia ywania twornika osi ga si poprzez zwi kszenie szczeliny powietrznej (bardziej równomierny rozk ad indukcji) oraz przesuwanie szczotek w kierunku osi neutralnej. Natomiast uzwojenie biegunów komutacyjnych ma za zadanie popraw komutacji i co za tym idzie unikni cie iskrzenia szczotek. Bieguny te umieszczone s w strefie gdzie nast puje przej cie zwojów twornika ze strefy oddzia ywania jednego bieguna głównego do drugiego. Indukowana przez uzwojenie biegunów komutacyjnych si e elektromotoryczna znosi si e elektromotoryczn indukowan w zwojach w tym rejonie i zapobiega iskrzeniu szczotek. Aby zlikwidowa szkodliwy wp e w oddzia ywania twornika w du ych maszynach stosuje si uzwojenia kompensacyjne. Uzwojenie to jest roz c one równomiernie w strefie biegunów głównych i umieszczone w k obkach nabiegunników. Jest ono po czone szeregowo z uzwojeniem twornika, a zmianie kierunku pr du w obwodzie twornika odpowiada zmiana kierunku pr du w uzwojeniu kompensacyjnym. Stosowanie uzwojenia kompensacyjnego znacznie podra a koszty maszyny, ale pozwala na powi kszenie mocy znamionowej maszyny przy tych samych wymiarach i pr dko ci obrotowej.

Ze wzgl du na sposób zasilania obwodu wzbudzenia rozró niamy nast puj ce typy maszyn pr du sta cego

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



Rys.7.3. Typy maszyn prądu stałego: a) maszyna obcowzbudna; b) maszyna bocznikowa; c) maszyna szeregową; d) maszyna szeregowo - bocznikowa

Na rys.7.3 podane zostały schematy tych maszyn. Przyjmij te w eksploatacji sposoby oznaczania zacisków uzwojeń :

- A1 A2** - uzwojenie twornika
- B1 B2** - uzwojenie biegunów komutacyjnych
- E1 E2** - uzwojenie wzbudzające bocznikowe
- D1 D2** - uzwojenie wzbudzające szeregowe
- F1 F2** - uzwojenie wzbudzające obce.

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 ; obrotów 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 twornika i moment elektromagnetyczny. Pole magnetyczne wytworzone przez prąd

w uzwojeniu wzbudzenia, przecinając uzwojenie twornika indukuje w nim siłę elektromotoryczną zgodnie z prawem Faradaya

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

gdzie: $c_e = \frac{p}{a} N = \text{const}$ jest stałą zależną od parametrów konstrukcyjnych maszyny.

Z prawa Laplace'a wiadomo, że w wyniku współdziałania prądu twornika 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: $c_m = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N = \text{const}$ jest stałą zależną od parametrów konstrukcyjnych maszyny.

W wiczeniu zapoznamy się z silnikiem bocznikowym oraz prądnicą obcowzbudną.

1.1. Silnik bocznikowy i obcowzbudny

Na podstawie II prawa Kirchhoffa dla silnika bocznikowego (rys.7.3b) zasilanego napięciem stałym U możemy 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 twornika;

ΔU_p - spadek napięcia na rezystancji przejściowej szczotki i komutatora ($\Delta U_p \approx 1V$).

Pomijając ΔU_p wzór (7.3) możemy przekształcić:

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

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 twornika przy stałym napięciu zasilającym i stałym prądzie wzbudzenia. Z przekształcenia wzorów (7.1) i (7.3) wynika, że prędkość obrotowa wyrażona jest zależnością $n=f(I_t)$

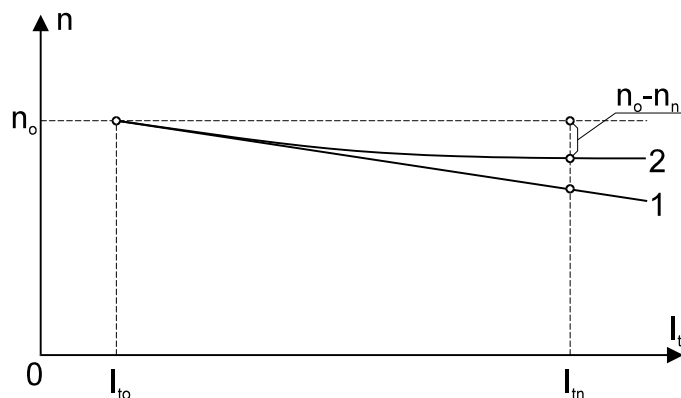
$$n = \frac{E - I_t \sum R_t}{c_e \Phi} \quad (7.5)$$

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 twornika - tzw. oddziaływanie twornika. Zaletą obydwu omawianych silników jest stosunkowo sztywna charakterystyka zewnętrzna. Zmienną prędkości obrotowej, definiowaną 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 biegu jałowego.



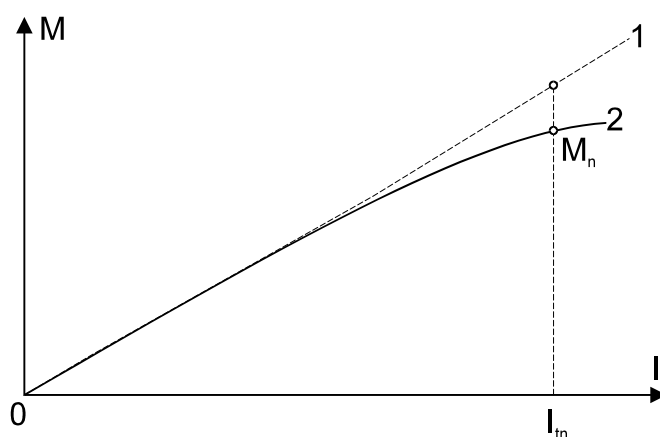
Rys.7.4. Charakterystyka zewn trzna silnika bocznikowego
1 - przy pomini ciu wp ywu oddzia ywania twornika; 2 - z uwzgl dnieniem oddzia ywania twornika

Charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$ pozwala oceni zachowanie si silnika w uk adzie nap dowym. Z wzorów (7.2) i (7.4) wynika, e dla $\Phi=\text{const}$ (czyli nie uwzgl dniaj c oddzia ywania twornika) charakterystyka ta b dzie funkcj malej c . Z warunków statecznej pracy uk adu nap dowego

$$\begin{aligned} M - M_h &= 0 \\ \frac{d(M - M_h)}{dn} &< 0 \end{aligned} \quad (7.7)$$

gdzie: M - moment silnika nap dowego; M_h - moment hamuj cy, wynika, e przy sta ym momencie M_h charakterystyka mechaniczna $n=f(M)$ powinna by funkcj malej c . W przeciwnym przypadku mog oby wyst pi rozbieganie lub utknie cie silnika. Sytuacja taka jest mo liwa przy znacznej reakcji twornika o charakterze rozmagnesowuj cym.

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



Rys.7.5. Charakterystyka momentu obrotowego silnika bocznikowego
1 - przy pomini ciu wp ywu oddzia ywania twornika; 2 - z uwzgl dnieniem oddzia ywania twornika

Charakterystyka momentu obrotowego jest to zależność pomiędzy momentem elektromagnetycznym rozwijanym przez silnik i prądem twornika, 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 twornika.

1.1.3. Rozruch silnika

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

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

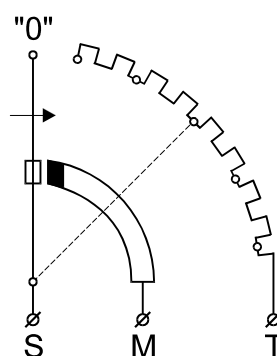
i jest około 10...30 razy większy od prądu znamionowego, przepływ tak dużego prądu może uszkodzić maszynę, jak również stanowi zbyt duże obciążenie sieci zasilającej. W związku z tym rozruch silnika dokonuje się poprzez regulację napięcia od 0 do wartości znamionowej (przy użyciu tyrystorowych zespołów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

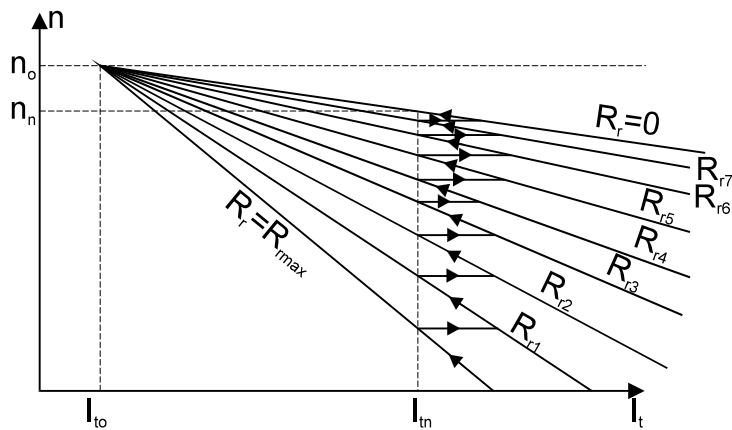
Wartość rezystancji R_r dobiera się tak, aby prąd rozruchowy nie przekraczał $(1,2...2)I_{tn}$. Rozruch silnika bocznikowego przeprowadza się zmieniając rezystancję R_r od wartości maksymalnej do zera, przy maksymalnym strumieniu wytworzonym przez uzwojenie. Ponieważ będzie zmniejszony prąd I_t dlatego, jak wynika ze wzoru (7.2), należy podczas rozruchu zapewnić maksymalny strumień, aby uzyskać duży moment elektromagnetyczny silnika i krótki czas rozruchu. Rozrusznik silnika bocznikowego (rys.7.6) jest więc zbudowany w taki sposób, aby w obwód twornika włączana była regulowana rezystancja, natomiast obwód wzbudzenia włączany bezpośrednio do sieci.



Rys.7.6. Schemat rozrusznika

Na rys.7.7 przedstawiono wpływ rezystancji rozrusznika na charakterystykę zewnętrzną silnika i przebieg rozruchu.

W wiczeniu został zastosowany tyrystorowy zespół napędowy.



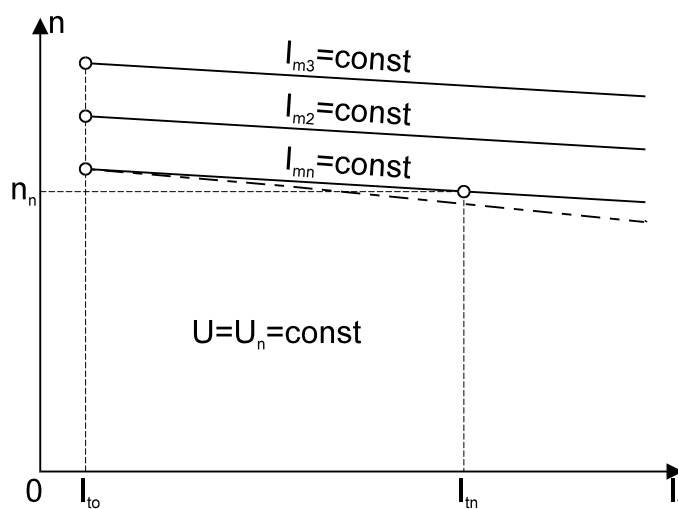
Rys.7.7. Przebieg rozruchu silnika bocznikowego

1.1.4. Regulacja pr dko ci obrotowej silnika bocznikowego

Regulacj pr dko ci obrotowej silnika bocznikowego mo emy przeprowadzi przez:

- zmian strumienia magnetycznego,
- zmian rezystancji w obwodzie twornika,
- zmian napi cia zasilaj cego.

Ad a) Zmian warto ci strumienia magnetycznego mo na uzyska w€czaj c rezystancj dodatkow do obwodu wzbudzenia. Tym sposobem mo emy regulowa pr dko w gór (rys.7.8).

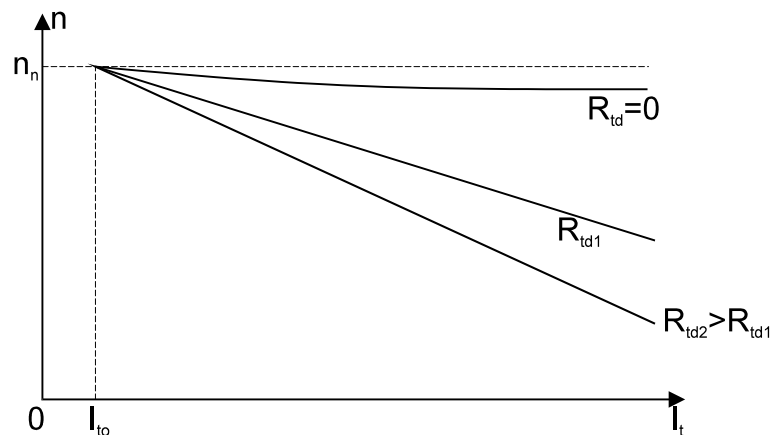


Rys.7.8. Charakterystyki zewn trzne silnika bocznikowego przy ró nych warto ciach strumienia magnesuj cego

Ad b) W€czenie rezystancji dodatkowej w obwód twornika pozwala uzyska regulacj pr dko ci w dó€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. 7.9) jest silniej opadająca. A zatem ten sposób regulacji powoduje zmniejszenie sztywności charakterystyki zewnętrznej i wówczas prąd w znacznym stopniu zależy od obciążenia silnika.



Rys. 7.9. Charakterystyki zewnętrzne silnika bocznikowego przy włączonej szeregowo rezystancji dodatkowej R_d w obwodzie twornika

Do wad tego sposobu regulacji prądu i 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.

1.1.5. Tyrystorowe zespoły napędowe

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

Falownik oddający energię do sieci prądu przemiennego, zastosowany w wiczeniu jako obciążenie prądnic 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.

1.2. Silnik szeregowy

Silniki szeregowe ze względu na swoje właściwości (duży moment rozruchowy i duży rozbieg to osi ganych przy dużych obrotach) stosowane są głównie w trakcji elektrycznej (koleje, tramwaje, trolejbusy, kolejki, wózki akumulatorowe), gdzie pracują sprężynnie na stałym napięciu z osi pojazdu w sposób nierozdzielny.

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

W silniku szeregowym uzwojenie wzbudzące i uzwojenie twornika połączone są szeregowo, tak więc prąd 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;

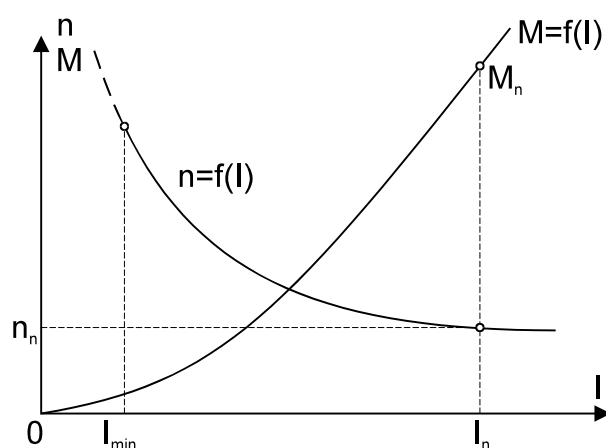
R_m - rezystancja uzwojenia wzbudzenia;

ΔU_p - spadek napięcia na rezystancji przejściowej szczotek i komutatorem ($\Delta U_p \approx 1V$ - pomijalnie mały).

Prędkość obrotowa silnika szeregowego po uwzględnieniu zależności prądu 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.7.10. 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 wartość dopuszczalną, czego konsekwencją jest uszkodzenie części mechanicznych i

zniszczenie silnika. Ponadto stanowi niebezpieczeństwo dla obsługi. Całkowite odciążenie silnika szeregowego jest niedopuszczalne. Dlatego silniki szeregowe należy łączyć trwale z napędzanymi przez nie maszynami za pomocą sprzęg nierozłączalnych lub przekładni z batych, a nie przekładni pasowych. Na tabliczce znamionowej silnika szeregowego powinna być podana dopuszczalna obrotowa prędkość maksymalna.

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

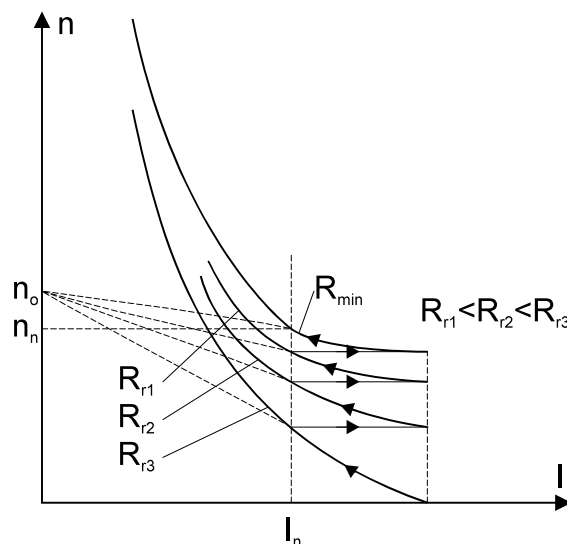
Charakterystyka momentu, podobnie jak charakterystyka zewnętrzna wyznaczana jest przy stałym napięciu zasilającym. Kształt tej charakterystyki po uwzględnieniu proporcjonalności strumienia od prądu twornika przyjmie postać:

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

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 7.10 zostały pokazane charakterystyki zewnętrzne 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).

1.2.3. Rozruch silnika

Rozruch 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. 7.11), a zatem poprzez regulację R_r od maksimum do zera osi prądu możemy uzyskać wzrost prędkości obrotowej silnika od zera do wartości znamionowej.

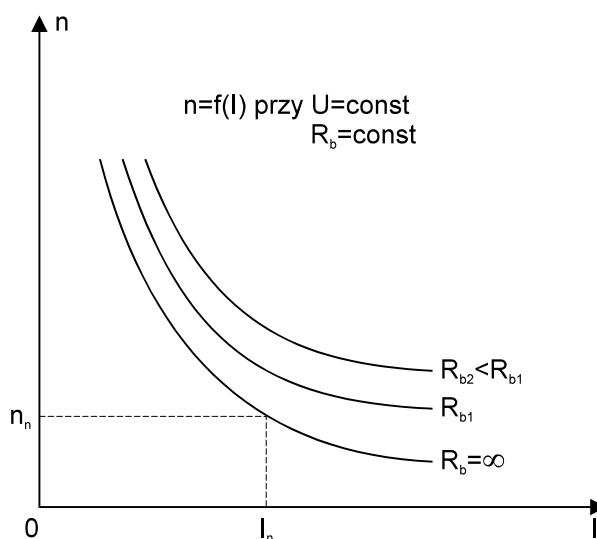


Rys.7.11. Przebieg rozruchu silnika szeregowego

1.2.4. Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego

Regulacja prędkości obrotowej w silniku szeregowym może przeprowadzać się przez:

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



Rys.7.12. Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego przez bocznikowanie uzwojenia wzbudzącego

Ad.1. Zmiana wartości strumienia magnetycznego osiąga się przez bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia lub uzwojenia twornika silnika szeregowego. W pierwszym sposobie, po zbocznikowaniu, przez uzwojenie magnesujące prąd jest mniejszy, a w konsekwencji wzrasta prędkość obrotowa (rys.7.12).

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 twornikiem i umożliwia regulację prędkości obrotowej w dół. Jest to również sposób nieekonomiczny.

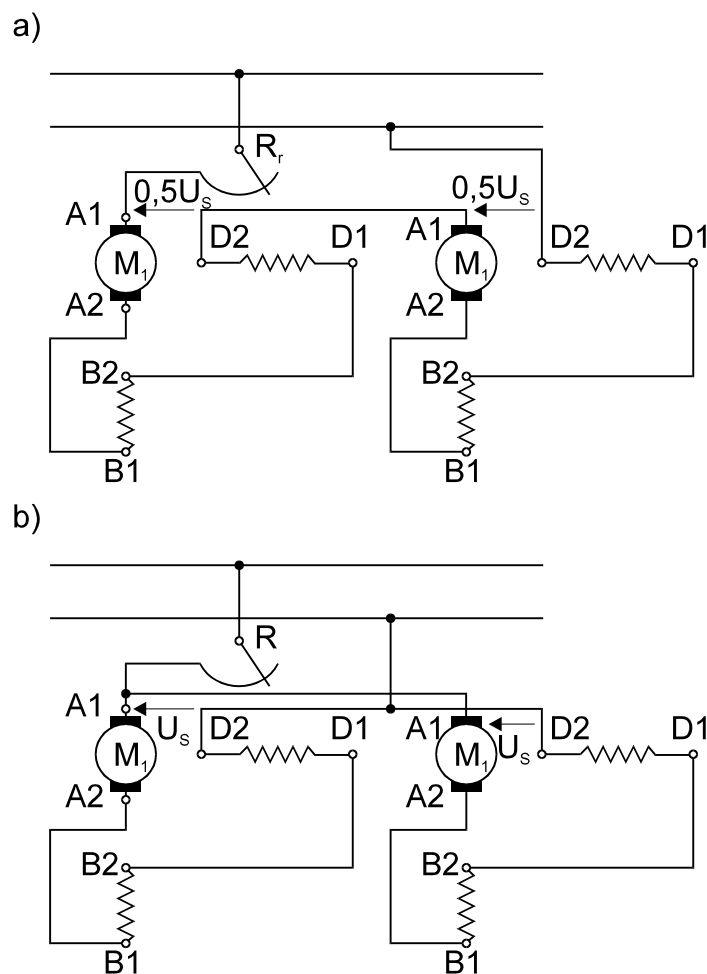
Ad.3. Regulację prędkości przez zmianę napięcia zasilającego uzyskuje się przez zmianę napięcia w sieci zasilającej lub przez połączenie szeregowo-równoległe dwóch lub więcej mechanicznie ze sobą sprzęgniętych silników. Najbardziej rozpowszechnionym układem jest układ trakcyjny jako zespół dwóch, czterech lub sześciu silników szeregowych, które początkowo łączą się szeregowo, a następnie równolegle. Na rysunku 7.13 pokazano przykładowo sposób połączenia 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 regulacji, gdy napięcie na silnikach może się zmieniać od $1/4 U$ (połączenie szeregowe) poprzez $1/2 U$ (połączenie szeregowo-równoległe) do U (połączenie równoległe). W polskich kolejach stosowane jest napięcie sieci 3kV a napięcie znamionowe silników wynosi 1,5kV, 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. Zgodzenie gwałtownej zmiany prędkości na osi gąsienicy 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 precyzyjna.



Rys.7.13. Układ trakcyjny dwóch silników szeregowych: a) połączenie szeregowe silników; b) połączenie równoległe silników

1.3. Prądnicia bocznikowa i obcowzbudna

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika prądnicy zależy, zgodnie ze wzorem (7.1), od prędkości maszyny napędzającej i strumienia magnetycznego. Zgodnie z II prawem Kirchhoffa napięcie na zaciskach prądnicy bieżącej różni się od napięcia indukowanego siłą elektromotoryczną o spadki napięcia na rezystancji obwodu twornika i rezystancji przejściowej pomiędzy szczotkami a komutatorem

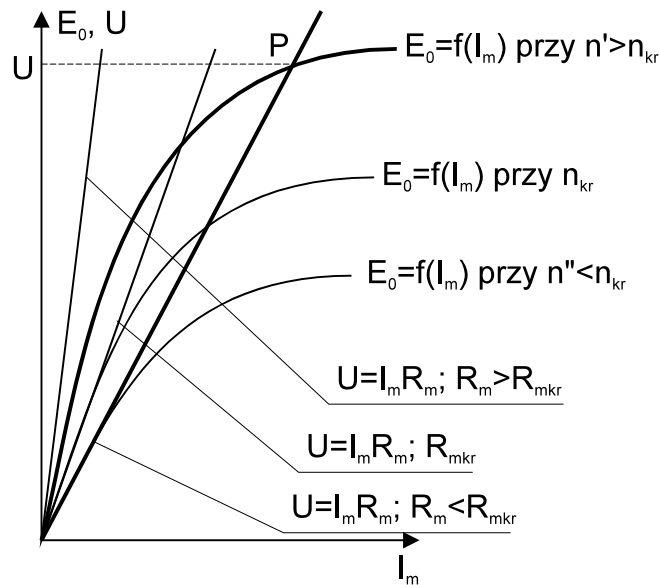
$$U = E - (I_t \sum R_t + 2\Delta U_p) \quad (7.16)$$

1.3.1. Warunki wzbudzenia prądnic samowzbudnej

Uzwojenie wzbudzające prądnic 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 magnetycznego szczotkowego maszyny przez prąd płynący w uzwojeniu wzbudzenia, co uniemożliwi wzbudzenie prądnic. **Warunkiem wzbudzenia prądnic** bocznikowej samowzbudnej obok istnienia magnetyzmu szczotkowego 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 zapewnianego wzrostu strumienia.

Przebieg charakterystyki biegu jałowego prądnic $E_0=f(I_m)$ zależy od prędkości maszyny napędzającej. Im większa prędkość tym prądnicia 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 prądnic $E_0=f(I_m)$. Jeżeli $R_m < R_{mkr}$, charakterystyki $E_0=f(I_m)$ i $U = I_m \cdot R_{mkr}$ przecinają się określając napięcie wzbudzenia prądnic przy biegu jałowym. Natomiast jeżeli charakterystyki te nie mają punktu wspólnego maszyna nie może pracować jako prądnicia samowzbudna. Spełnienie warunków $n > n_{kr}$ i $R_m < R_{mkr}$ jak pokazuje rys.7.14 zapewnia przecięcie charakterystyki biegu jałowego prądnic $E_0=f(I_m)$ z prostą $U = I_m R_m = f(I_m)$ i ustalenie punktu pracy, to jest napięcia, do którego prądnicia może się wzbudzić przy biegu jałowym.

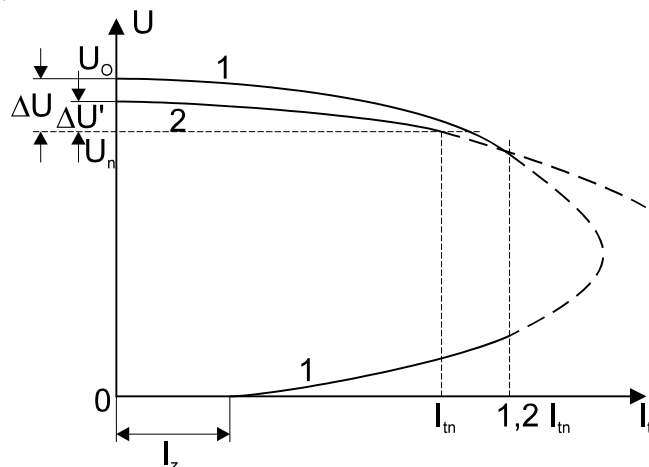
Uruchomienie prądnic przeprowadzamy przy maksymalnej rezystancji włączonej do obwodu wzbudzenia, którą następnie stopniowo zmniejszamy. Ma to zapobiec pojawieniu się nagle zbyt dużego napięcia na zaciskach prądnic.



Rys.7.14 Warunki samowzbudzenia pr dnicy bocznikowej

1.3.2. Charakterystyka zewn trzna $U=f(I_t)$

Charakterystyka zewn trzna pr dnicy jest to zale no napi cia na zaciskach pr dnicy od pr du obci enia przy sta ej pr dko ci obrotowej, oraz - dla pr dnicy samowzbudnej - przy sta ej rezystancji w obwodzie wzbudzenia $R_m = \text{const}$, natomiast dla pr dnicy obcowzbudnej - przy sta ej napi ciu obwodu wzbudzenia $U_m = \text{const}$. Jak wynika z rys.7.15 pr d zwarcia pr dnicy bocznikowej jest znacznie mniejszy ni pr d znamionowy i zale y od si y elektromotorycznej b d cej wynikiem dzia enia magnetyzmu szcz tkowego. Pr d zwarcia pr dnicy obcowzbudnej (przy pe ym wzbudzeniu) mo e osi gn 15...20-krotno warto pr du znamionowego.



Rys.7.15. Charakterystyki zewn trzne pr dnicy: 1 - samowzbudnej; 2 - obcowzbudnej

Zalet pr dnicy obcowzbudnej jest niewielka zmienno napi cia okre lona równaniem

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

k tóra mie ci si w granicach (5...10)%. Dla pr dnicy samowzbudnej wynosi ona (15...25)%.

2. Badania laboratoryjne

2.1. Badanie silnika obcowzbudnego

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

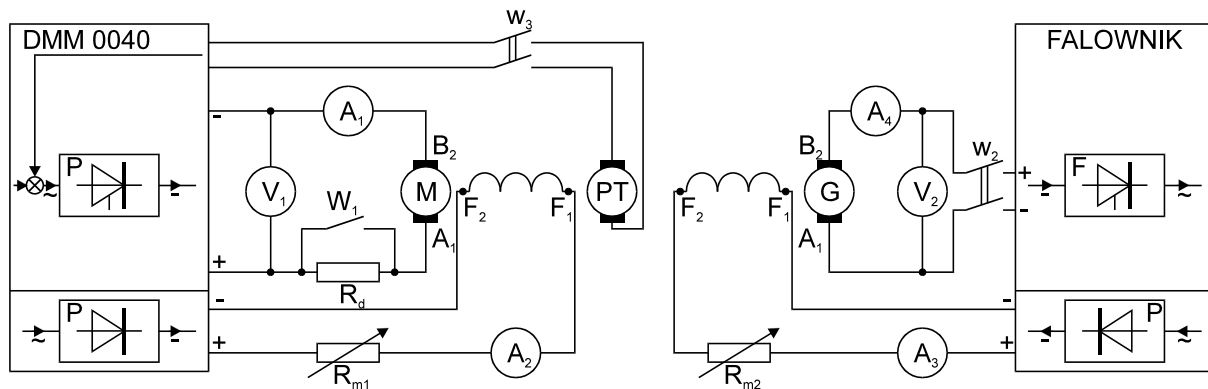
Typ silnika...

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

2. Prędzina obcowzbudna

Typ prędziny ...

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



7.16. Schemat układu pomiarowego

Oznaczenia:

M - silnik

G - prędzina (hamulec)

A₁ - amperomierz do pomiaru prądu twornika silnika

A₂ - amperomierz do pomiaru prądu wzbudzenia silnika

A₃ - amperomierz do pomiaru prądu wzbudzenia prędziny

A₄ - amperomierz do pomiaru prądu twornika prędziny

V₁ - woltomierz do pomiaru napięcia na zaciskach silnika

V₂ - woltomierz do pomiaru napięcia na zaciskach prędziny

R_{m1} - opornik do regulacji prądu wzbudzenia silnika

R_{m2} - opornik do regulacji prądu wzbudzenia prędziny

R_d - opornik dodatkowy w obwodzie twornika silnika

DMM - zespół tyrystorowy do napędzania silników prądu stałego

F - falownik stanowiący obciążenie prędziny

(praca hamulcowa).

Wykonywanie pomiarów.

Po zapoznaniu się z układem i sprawdzeniu połączeń należy:

- połączyć wyłączniki w_1 i w_3 ustawić przed załączeniem napięcia, wyłącznik w_2 pozostawić otwarty,
- sprawdzić czy pokrętki 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 przemienne 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 stykownik (zielony przycisk) i dokonać rozruchu silnika poprzez regulację napięcia zasilającego silnik od wartości znamionowej,
- opornikiem R_{m1} wyregulować prąd wzbudzenia silnika do wartości znamionowej, wykonać pomiary dla stanu jałowego silnika, zamknąć wyłącznik w_2 (poprzez stykownik) i obciążyć układ silnik - prądnicą regulując pokrętką 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**.

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. 2.1.

Wyłącznik w_1 zamknąć a w_3 pozostawić otwarty. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachować kolejno czynności podane wyżej (2.1), przy ustawionej znamionowej wartości prądu wzbudzenia silnika. Obciążony układ tak, aby prąd w obwodzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{t0} do $1,2I_{tm}$. Wyniki pomiarów i obliczenia zanotować w tabeli 7.1.

Tab. 7.1.

$U_m=220V$

Lp.	n	U_t	I_t	I_m	P_{1s}	U_p	I_{tp}	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:

$$P_{1s}=U_t I_t+U_m I_m \text{ - moc pobierana przez silnik,}$$

$P_{2p} = U_p I_p$ - moc oddawana przez pr dnic ,

$P_{1p} = P_{2s} = \frac{P_{1s} + P_{2p}}{2}$ - moc oddawana przez silnik do pr dnicy.

Dla zbli onych parametrów maszyn przyj to równy rozdział strat mocy na silnik i pr dnic .

$M_u = \frac{P_{2s}}{\omega} = \frac{P_{2s} \cdot 60}{2\pi n}$ - moment u yteczny na wale silnika,

$\eta_s = \frac{P_{2s}}{P_{1s}}$ - sprawno silnika.

2.1.3. Regulacja pr dko ci obrotowej przez zmian strumienia magnesuj cego

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 2.1.

Górna warto obrotów silnika jest ograniczona ze wzgl du na wytrzymaó mechaniczn twornika i dlatego rezystancj R_m nale y zmieni tak, aby pr dko obrotowa w stanie jaówym nie przekraczaó 1,2 n_n .

Wyócznik w_1 zamkn a w_3 pozostawi otwarty. Nale y wykona rozruch silnika i pomiary zachowuj c kolejno czynno ci podan wy ej (2.1), dla dwóch ró nych od znamionowej warto ci pr du wzbudzenia (R_{m1}). Obci y układ tak, aby pr d w obwodzie twornika silnika zmieniaó si w granicach od I_{t0} do $1,2I_{tn}$. Wyniki pomiarów i oblicze zanotowa w tabelach jak 7.2.

Tab. 7.2.

$I_m = \dots$

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

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

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 2.1, przy włączeniu w obwód twornika silnika rezystancji dodatkowej $R_d=7\Omega$.

Wyłączniki w_1 i w_3 otwórz. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachować kolejno czynności podane wyżej (2.1), przy ustawionej znamionowej wartości prądu wzbudzenia (R_{m1}). Obciążenie układać tak, aby prąd w obwodzie twornika silnika zmieniał się w granicach od I_{t0} do $1,2I_{tn}$. Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 7.3.

Tab.7.3.
 $R_d=7\Omega$ $U_s=...$

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

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. 2.1.

Wyłączniki w_1 i w_3 zamknij. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachować kolejno czynności podane wyżej (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.

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

Wyniki pomiarów i obliczenia zanotować w tabeli 7.4.

Tab.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 wykresowane na papierze milimetrowym: momentu $M_u = f(I_t)$; mechanicznej $n = f(M_u)$; sprawności $\eta_s = f(I_t)$ oraz na wspólnych wykresach charakterystyki zewnętrzne: przy różnych wartościach strumienia magnesującego $n = f(I_t)$ (takie przy wartości znamionowej), z włączoną rezystancją w obwód twornika $n = f(I_t)$ i przy włączonym sprężeniu prądowym zespołu napędowego silnika.
3. Obliczone - na podstawie charakterystyki zewnętrznej wyznaczonej przy znamionowym prądzie wzbudzenia I_{m1} i przy $R_d = 0$ - znamionowej prędkości obrotowej.

2.2. Badanie prędkości obrotowej

2.2.1. Dane znamionowe

Dane znamionowe prędkości obrotowej podane na tabliczce znamionowej umieścić w sprawozdaniu.

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

Włączenie sprężenia prądowego zespołu napędowego sterującego silnik zapewnia stałą prędkość prędkości podczas pomiaru.

Pomiary wykonujemy w układzie, którego schemat został podany w p. 2.1.

Wyłączniki w_1 i w_3 zamknąć. Należy wykonać rozruch silnika i pomiary zachować kolejno czynności podane w jej (2.1). Za pomocą opornika R_{m2} ustawić prąd wzbudzenia w obwodzie prędkości $0,26A$. Poprzez regulację napięcia zasilającego silnik ustawić znamionową prędkość obrotową prędkości. Obciążenie układać tak, aby prąd w obwodzie twornika prędkości zmieniał się w granicach od 0 do $1,2I_{tn}$.

Wyniki pomiarów notujemy w tabeli 7.5.

Tab.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 prądu przy obciążeniu $U=f(I_p)$ oraz obliczyć znamionową moc przy obciążeniu.

3. Uwagi i wnioski

Opisać kształt charakterystyk silnika obciążonego. Określić wady i zalety eksploatacyjne silnika obciążonego i prądu przy obciążeniu w stosunku do innych maszyn prądu stałego.