

ĆWICZENIE 3

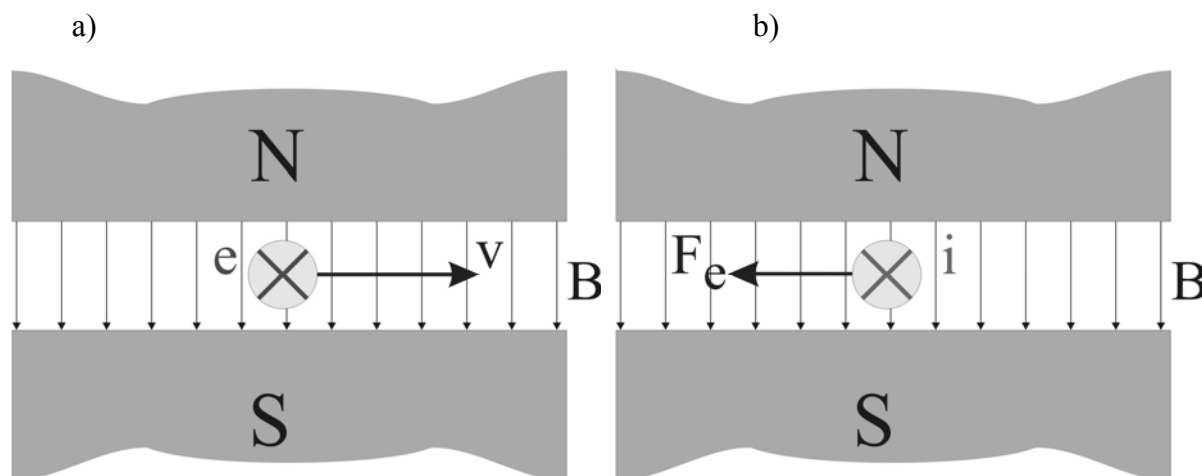
BADANIE SILNIKA BOCZNIKOWEGO PRĄDU STAŁEGO

Cel ćwiczenia: poznanie budowy, zasady działania, sposobu rozruchu i podstawowych charakterystyk silnika bocznikowego prądu stałego.

3.1. Budowa i zasada działania maszyny prądu stałego

Maszyna prądu stałego, podobnie jak większość maszyn elektrycznych, jest maszyną odwracalną tzn. może pracować zarówno jako silnik jak i jako prądnica. Prądnica zamienia energię mechaniczną napędzającą twornik w energię elektryczną a silnik dostarczoną energię elektryczną w energię mechaniczną ruchu obrotowego.

Zasada działania maszyn prądu stałego opiera się na wykorzystaniu dwóch podstawowych praw dotyczących indukowania napięcia w przewodniku poruszającym się w stałym polu magnetycznym oraz elektrodynamicznego oddziaływania na przewód z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym. Prawa te obrazuje rys. 3.1.



Rys. 3.1. Napięcie indukowane w przewodzie poruszającym się w stałym polu magnetycznym a) oraz siła działająca na przewód z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym b)

Chwilowa wartość napięcia indukowanego w przewodzie e jest wprost proporcjonalna do indukcji magnetycznej B , prędkości poruszania się przewodu v i jego długości l (rys.3.1a). Przy prostopadłości wektorów \vec{B} i \vec{v} chwilową wartość napięcia indukowanego możemy wyznaczyć z uproszczonego wzoru

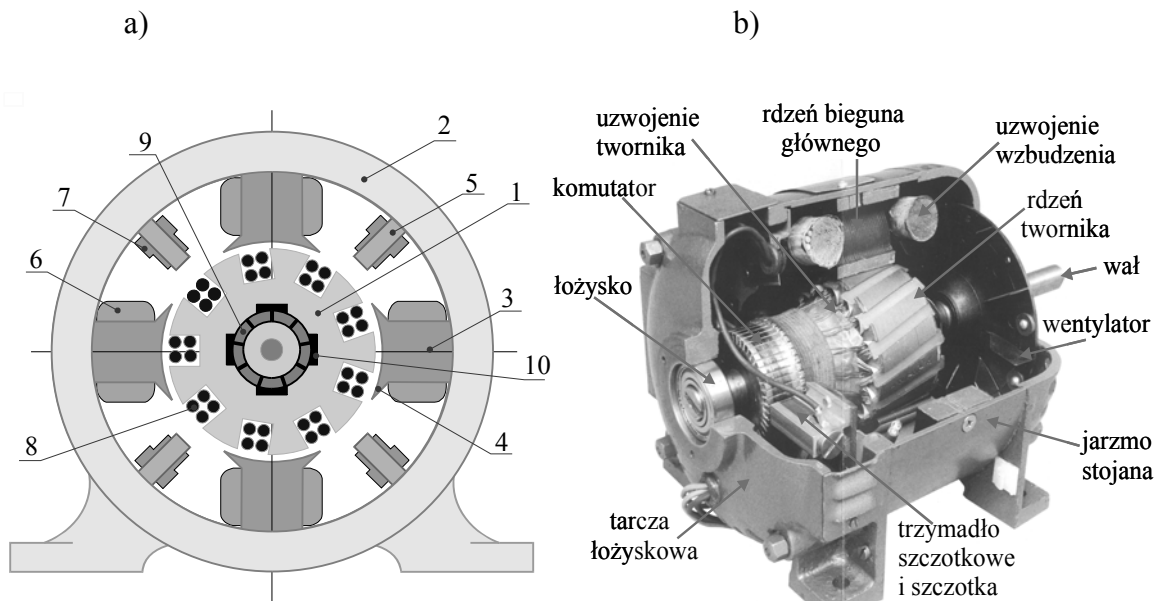
$$e = B \cdot l \cdot v \quad (3.1)$$

Zwrot tego napięcia określa reguła prawej dłoni. Regułą tą możemy zdefiniować następująco, jeżeli prawą dłoń umieścimy w polu magnetycznym tak, że linie sił pola magnetycznego będą wchodziły w otwartą dłoń, a odgięty kciuk wskaże kierunek ruchu przewodu, to wyciągnięte palce wskażą zwrot indukowanego napięcia (rys.3.1a).

Siła F_e działająca na przewód z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym jest proporcjonalna do indukcji B i długości przewodu l oraz do prądu w przewodzie I (rys.3.1b). Wartość tej siły w najprostszym przypadku określa zależność

$$F_e = B \cdot I \cdot l, \quad (3.2)$$

a kierunek jej działania określa się regułą lewej dłoni. Regułą tą możemy zdefiniować następująco, jeżeli lewą dłoń umieścimy w polu magnetycznym tak, że linie sił pola będą wchodziły w otwartą dłoń, a wyciągnięte palce będą wskazywały kierunek prądu, to odgięty kciuk wskaże kierunek działania siły (rys.3.1b)



Rys. 3.2. Budowa maszyny prądu stałego: szkic przekroju poprzecznego a), widok wykroju rzeczywistej maszyny b). 1- twornik, 2 - jarzmo stojana, 3 - biegun główny, 4 - nabiegunnik, 5 - biegun pomocniczy (komutacyjny), 6 - uzwojenie wzbudzenia, 7 - uzwojenie biegunów pomocniczych, 8 - uzwojenie twornika, 9 - komutator, 10 - szczotki.

Przekrój poprzeczny szkicu budowy maszyny prądu stałego przedstawia rys.3.2a a widok wykroju rzeczywistej maszyny rys.3.2b. Maszyna prądu stałego składa się z części nieruchomych zwanych stojanem i części wirujących zwanych twornikiem. Do stojana należy jarzmo (wykonane z materiału ferromagnetycznego), do którego przytwierdzone są bieguny główne oraz bieguny pomocnicze (jeżeli istnieją) wraz z uzwojeniami i tarcze łożyskowe. Bieguny główne mają za zadanie wytworzenie stałego pola magnetycznego, czyli wzbudzenia maszyny. Stały strumień magnetyczny może być wytworzony przez magnesy trwałe lub

cewkę skupioną nawiniętą na biegunach głównych zasilaną prądem stałym (jak na rys.3.2). W maszynach większej mocy (zwykle powyżej 1kW) między biegunami głównymi umieszcza się bieguny pomocnicze. Bieguny te mają za zadanie ograniczenie oddziaływania twornika oraz poprawę warunków komutacji. Jarzmo stojana wykonuje się najczęściej z litego ferromagnetyka, a bieguny główne i pomocnicze z blach ze stali elektrotechnicznej w celu minimalizacji strat związanych z prądami wirowymi wywołanymi składową zmienną strumienia magnetycznego.

Twornik maszyny składa się z wału, na który wprasowany jest rdzeń i komutator. Rdzeń twornika pakietuje się z blach ze stali elektrotechnicznej pokrytych cienką warstwą lakieru izolacyjnego. Blachy mają po obwodzie zewnętrznym wykrawane żłobki. W żłobkach rdzenia twornika znajdują się uzwojenia połączone odpowiednio z wycinkami komutatora tak, aby pod jednoimiennym biegunem przez wszystkie pręty uzwojenia płynął prąd tylko w jednym kierunku.

Komutator ma odpowiednią liczbę wycinków wykonanych z miedzi z odpowiednimi domieszkami. Wycinki komutatora, do których przyłącza się początki i końce odpowiednich zezwojów są przedzielane przekładkami izolacyjnymi. Komutator wykonuje się w postaci walca, po którego powierzchni zewnętrznej ślizgają się przewodzące szczotki wykonane głównie z grafitu z domieszkami.

Podstawowym elementem uzwojenia twornika jest zezwój, którego rozpiętość jest w przybliżeniu równa podziałce biegunowej. Przy takiej rozpiętości zezwoju jest on skojarzony z możliwie największym strumieniem magnetycznym. Zezwoje te łączone są ze sobą szeregowo (poprzez wycinki komutatora) i tworzą między szczotkami gałęzie równoległe. Liczba gałęzi jest zawsze parzysta i zależy od rodzaju zastosowanego uzwojenia. Dla uzwojeń falistych twornik ma zawsze dwie gałęzie równoległe (jedną parę), a dla uzwojeń pętlicowych liczba par gałęzi równoległych jest równa liczbie par biegunów. Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego są więc uzwojeniami zamkniętymi.

Do uzwojeń doprowadzany (lub odprowadzany) jest prąd za pomocą zestyku szczotka – komutator. W czasie wirowania twornika po komutatorze maszyny ślizgają się szczotki znajdujące się w nieruchomych oprawkach (dociskane sprężynami) umocowanych w trzymadłach szczotkowych. Służą one do doprowadzania do twornika (praca silnikowa) lub odprowadzania z twornika (praca prądnicowa) energii elektrycznej.

Po doprowadzeniu energii mechanicznej do twornika wprawiamy go w ruch i na zaciskach wzbudzonej maszyny pojawia się napięcie proporcjonalne do strumienia magnetycznego Φ i prędkości obrotowej n oraz stałej maszynowej c_E zgodnie ze wzorem

$$E = c_E \cdot \Phi \cdot n \quad (3.3)$$

gdzie: $c_E = \frac{N \cdot p}{60a}$, N – liczba prętów uzwojenia twornika, p – liczba par biegunów stojana,

a – liczba par gałęzi równoległych uzwojenia twornika.

Maszyna pracuje wtedy jako prądnica prądu stałego.

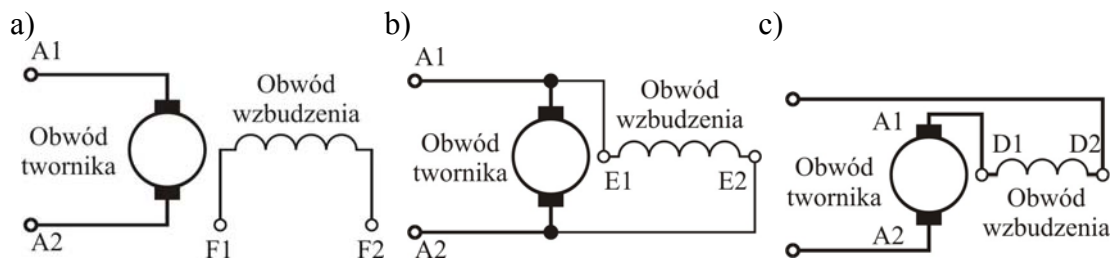
Po doprowadzeniu do twornika wzbudzonej maszyny energii elektrycznej prądu stałego w jego uzwojeniach twornika popłynie prąd i wytworzony zostanie moment obrotowy proporcjonalny do strumienia magnetycznego Φ i prądu twornika I_t oraz stałej maszynowej c_M zgodnie ze wzorem

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_t, \quad (3.4)$$

gdzie $c_M = \frac{N \cdot p}{2\pi \cdot a}$.

Maszyna prądu stałego pracuje wtedy jako silnik i w dalszych rozważaniach będziemy zajmowali się tylko silnikami.

Symbol graficzny przedstawiający silnik prądu stałego na schematach elektrycznych zależy od sposobu wzbudzenia tj. sposobu wytworzenia stałego strumienia w obwodzie magnetycznym. Strumień wzbudzenia może być wytworzony przez magnes lub elektromagnes, czyli uzwojenie wzbudzenia nawinięte na biegunach głównych zasilane prądem stałym. Własności maszyny zależą od sposobu połączenia uzwojenia wzbudzenia z twornikiem. Schemat ideowy maszyny obcowzbudnej, bocznikowej i szeregowej przedstawia odpowiednio rys.3.3a, rys.3.3b i rys.3.3c.



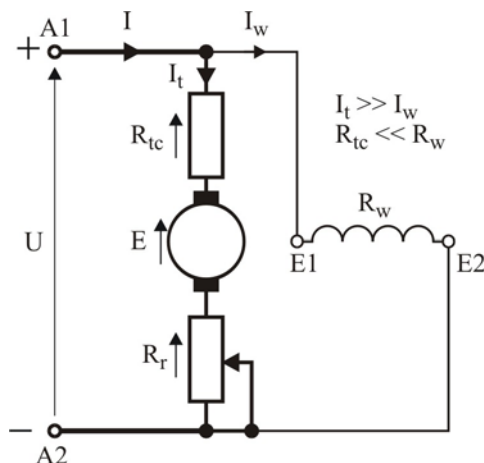
Rys.3.3. Schemat ideowy maszyny prądu stałego: obcowzbudnej a), bocznikowej b) i szeregowej c).

Wyprowadzenia uzwojeń wzbudzenia i twornika są oznakowane literami pokazanymi na schemacie.

3.2. Rozruch silników prądu stałego

Rozruchu silników prądu stałego, szczególnie dużej mocy, niezależnie od sposobu wzbudzenia, dokonuje się najczęściej za pomocą rozrusznika, czyli rezystancji dodatkowej

włączanej w obwód twornika a rzadziej przez obniżenie napięcia podawanego na twornik. Sposób rozruchu z wykorzystaniem rozrusznika zostanie omówiony na przykładzie silnika bocznikowego, którego schemat elektryczny przedstawiony jest na rys. 3.4.



Rys.3.4. Schemat elektryczny silnika bocznikowego.

Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa bilans napięć dla obwodu twornika silnika przy zwartym rezystorze R_r można zapisać

$$U = E + I_t \cdot R_{tc} \quad (3.5)$$

Stąd prąd twornika wyraża się wzorem

$$I_t = \frac{U - E}{R_{tc}} \quad (3.6)$$

Prąd wzbudzenia I_w ma w porównaniu z prądem twornika I_t małą wartość, gdyż rezystancja uzwojenia wzbudzenia R_w jest dużo większa od całkowitej rezystancji twornika R_{tc} .

Z powyższych wzorów widać, że w początkowej chwili rozruchu, gdy prędkość obrotowa n jest równa lub bliska zeru, to napięcie indukowane E jest małe, a prąd płynący przez twornik silnika zgodnie ze wzorem (3.6) ma bardzo dużą wartość (wielokrotnie większą od prądu znamionowego). Duży prąd twornika powoduje szybkie nagrzewanie się uzwojeń, gdyż ilość wydzielonego ciepła zależy od kwadratu prądu oraz powoduje powstawanie dużych sił elektrodynamicznych oddziaływujących na przewody z prądem umieszczone w stałym polu magnetycznym. Zarówno działania cieplne jak i elektrodynamiczne mogą być szkodliwe dla silnika i dla sieci zasilającej. Dlatego na czas rozruchu, głównie w silnikach dużej mocy, włącza się szeregowo w obwód twornika dodatkową rezystancję R_r , która wraz z rezystancją twornika R_{tc} ogranicza prąd rozruchowy do bezpiecznej wartości (zwykle nie przekraczającej trzykrotnej wartości prądu znamionowego I_N). Rozruch polega na płynnym

zmniejszaniu rezystancji rozruchowej, aż do całkowitego jej zwarcia. Jednocześnie ze zmniejszaniem rezystancji rozruchowej wzrasta prędkość obrotowa silnika. Przy biegu jałowym silnika prąd twornika ma wartość najmniejszą, gdyż prędkość obrotowa a więc i napięcie indukowane w uzwojeniach twornika (przeciwnie skierowane do napięcia zasilającego) jest największe.

Rozruchu silników prądu stałego możemy dokonywać również przy obniżonym napięciu zasilającym.

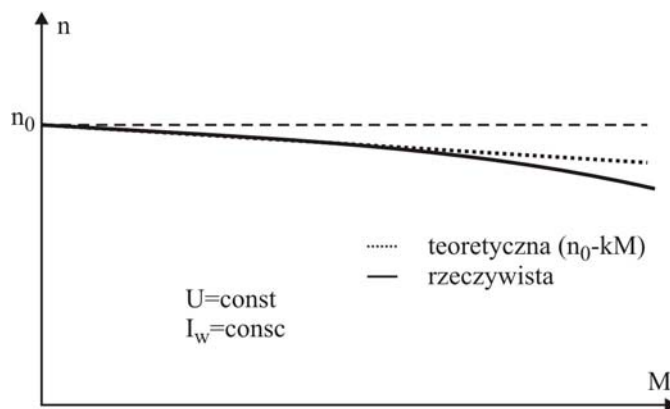
W napędach elektrycznych z elektronicznymi układami sterowania rozruchu dokonuje się zwykle przez ograniczanie prądu twornika dzięki zastosowaniu prądowego sprzężenia zwrotnego.

W silnikach prądu stałego małych mocy oraz w silnikach o specjalnych konstrukcjach istnieje możliwość bezpośredniego rozruchu. Taki rozruch stosuje się wtedy, gdy chcemy zminimalizować czas trwania stanów przejściowych układu napędowego.

3.3. Charakterystyki robocze silnika bocznikowego

Charakterystyką mechaniczną silnika elektrycznego nazywamy zależność prędkości obrotowej n od momentu M przy stałym napięciu twornika U_t i stałym prądzie wzbudzenia I_w .

Przebieg teoretycznej i rzeczywistej charakterystyki mechanicznej $n=f(M)$ silnika obcowzbudnego i bocznikowego przedstawia rys. 3.5.



Rys.3.5. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego.

Przy założeniu stałości strumienia magnetycznego charakterystyka ta zgodnie ze wzorami (3.3), (3.4) i (3.5) przyjmuje przebieg prostoliniowy opisany wyrażeniem

$$n = \frac{U - I_t \cdot R_{tc}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{U}{c_E \cdot \Phi} - \frac{R_{tc}}{c_M \cdot c_E \cdot \Phi^2} M = n_0 - k \cdot M \quad (3.7)$$

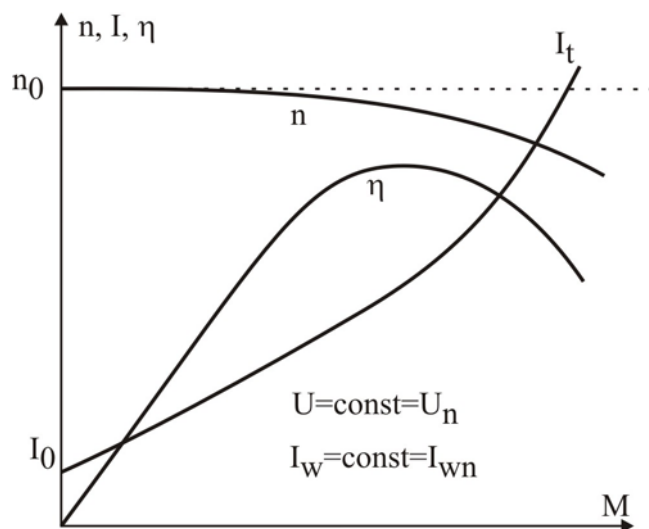
Ze względu na oddziaływanie twornika rzeczywista charakterystyka odchyła się od linii prostej, tym bardziej im większy jest moment obciążenia, a więc i prąd twornika. Oddziaływanie twornika polega na dodawaniu się strumienia magnetycznego wywołanego prądem twornika do głównego strumienia wzbudzenia. Wypadkowy strumień występujący w obwodzie magnetycznym maszyny jest sumą strumienia wzbudzenia i strumienia oddziaływania twornika. W wyniku tego oddziaływania przy nienasyconym obwodzie magnetycznym ma miejsce tylko deformacja pola magnetycznego, a przy nasyceniu się obwodu magnetycznego również jego zmniejszanie.

Przebieg tej charakterystyki można również objaśnić w następujący sposób. Załóżmy na początek, że silnik pracuje w stanie ustalonym obciążony pewnym momentem hamującym.

Jeśli zwiększyć moment hamujący silnika, to chwilowo moment ten będzie większy niż moment obrotowy i silnik zwolni bieg. Wraz ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej zmaleje napięcie indukowane w uzwojeniach twornika silnika ($E=c_E \cdot \Phi n$), co powiększa różnicę $U-c_E \cdot \Phi n$ występującą w liczniku wyrażenia na prąd (wzór 3.6). Wzrasta wtedy prąd twornika, co pociąga za sobą wzrost momentu rozwijanego przez silnik (zgodnie z wyrażeniem $M=c_M \cdot \Phi \cdot I_t$), aż do zrównania się z momentem obciążenia. Proces przejściowy zostaje zakończony i nowy stan pracy ustali się przy nieco mniejszej prędkości obrotowej i większym momencie. Przy zmniejszaniu momentu hamującego zjawiska przebiegają podobnie, lecz w odwrotnym kierunku.

Do charakterystyk roboczych oprócz charakterystyki mechanicznej zaliczamy również zależności prądu twornika od momentu $I_t = f(M)$ i sprawności od momentu $\eta = f(M)$.

Przykładowy przebieg tych charakterystyk pokazano na rys.3.6.



Rys.3.6. Przykładowy przebieg charakterystyk roboczych silnika bocznikowego prądu stałego

Charakterystyka $I_t = f(M)$ wynika z zależności

$$I_t = \frac{M}{c_M \cdot \Phi}. \quad (3.8)$$

Przy założeniu stałości strumienia jest to funkcja liniowa. Charakterystyka nie przechodzi przez początek układu współrzędnych, ponieważ przy biegu jałowym płynie pewien prąd I_0 , wywołujący moment potrzebny na pokrycie strat biegu jałowego. Późniejszy wzrost prądu jest szybszy niż wynikałoby to z zależności prostoliniowej wskutek reakcji (oddziaływania) twornika.

Charakterystyka $\eta = f(M)$ przechodzi przez początek układu współrzędnych, ponieważ przy biegu jałowym silnik pobiera energię elektryczną, której nie oddaje na wale ($P_2=0$), lecz traci zamieniając na ciepło. W trakcie obciążania silnika zmienia się udział strat ΔP w całkowitej mocy pobranej przez silnik. Całkowite straty ΔP dzielą się na straty (w danych warunkach $U=const, n \approx const$) stałe (w obwodzie magnetycznym) oraz straty zmieniające się z kwadratem prądu (w uzwojeniach). Można stwierdzić, że sprawność zdefiniowana jako

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

osiąga maksimum, gdy straty zmienne są równe stratom stałym. Przy dalszym obciążaniu silnika straty w miedzi (uzwojeniach) przeważają nad pozostałymi stratami i sprawność silnika maleje.

3.4. Regulacja prędkości obrotowej silników prądu stałego

Prędkość obrotową silnika prądu stałego przy szeregowo włączonej rezystancji R_d w obwód twornika opisuje wzór

$$n = \frac{U - (R_{tc} + R_d) \cdot I_t}{c_E \cdot \Phi} \quad (3.10)$$

Wynikają stąd trzy sposoby regulacji prędkości obrotowej silnika, a mianowicie przez zmianę:

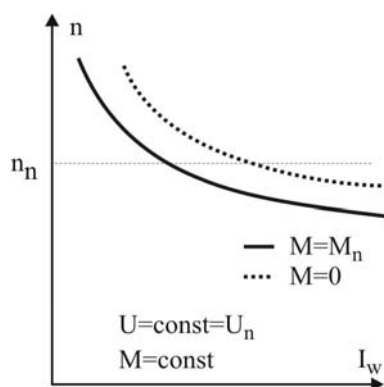
- napięcia zasilania twornika U ;
- dodatkowej rezystancji włączonej w obwód twornika R_d ;
- strumienia Φ (zależnego od prądu wzbudzenia I_w).

Pierwsze dwa sposoby mają ze sobą wiele wspólnego, ponieważ w efekcie każdego z nich zmienia się napięcie na zaciskach twornika. Pierwszy sposób regulacji prędkości obrotowej, przez zmianę napięcia zasilania, jest ekonomiczny. Regulacja prędkości obrotowej

za pomocą rezystancji dodatkowej w obwodzie twornika jest natomiast sposobem nieekonomicznym, ponieważ na dodatkowej rezystancji R_d tracona jest duża moc (równa $R_d I_t^2$) zamieniana w ciepło.

Obecnie często stosuje się pierwszy sposób regulacji prędkości obrotowej przez zmianę napięcia zasilającego, za pomocą układów elektronicznych wykorzystujących właściwości półprzewodnikowych zaworów sterowanych takich jak tyrystory i tranzystory. Właściwości przyrządów elektronicznych sprawiają, że regulacja taka ma dużą sprawność.

W przypadkach, kiedy potrzebne jest zwiększanie prędkości obrotowej wygodnie jest posłużyć się zmianą strumienia magnetycznego poprzez regulację prądu wzbudzenia rezystorem włączonym w obwód wzbudzenia silnika. Przykładowy przebieg charakterystyk regulacyjnych $n = f(I_w)$ przy stałym momencie obciążenia przedstawiony jest na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Charakterystyki regulacyjne $n = f(I_w)$ silnika bocznikowego przy $M=const$.

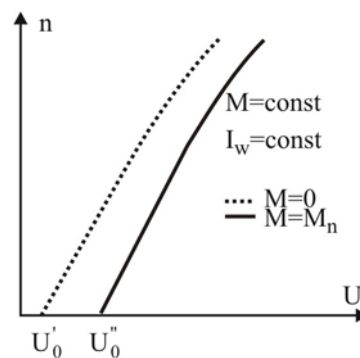
Przebieg tych charakterystyk zbliżony jest do hiperboli i wynika ze znanej już zależności

$$n = \frac{U - R_{tc} \cdot I_t}{c_E \Phi} \approx \frac{k}{\Phi} = \frac{k'}{I_w} \quad (3.11)$$

Licznik wyrażenia (3.11) przy zmianie strumienia zmienia się nieznacznie i można uważać, że jest stały. Wobec tego zmniejszając prąd wzbudzenia, a więc i strumień, uzyskuje się wzrost prędkości obrotowej. Należy uważać, aby podczas pracy silnika nie przerwać obwodu wzbudzenia, gdyż zmniejszenie się strumienia do wartości strumienia szczytkowego powoduje niedopuszczalny wzrost prędkości obrotowej (tzw. rozbieganie się silnika) przy jednoczesnym wzroście prądu twornika zgodnie z zależnością (3.8). Prędkość obrotową przez zmianę strumienia można praktycznie tylko zwiększać i regulacja ta nazywa się regulacją w górę. Zwiększanie strumienia, a więc zmniejszenie prędkości obrotowej jest ograniczone ze względu na nasycanie się obwodu magnetycznego silnika. Przy nienasyconym obwodzie

magnetycznym strumień rośnie proporcjonalnie do prądu wzbudzenia. Nasycaenie się obwodu magnetycznego wraz ze wzrostem prądu wzbudzenia powoduje, że strumień narasta coraz wolniej zbliżając się asymptotycznie do wartości ustalonej. Dalsze więc zwiększanie prądu wzbudzenia powoduje nieznaczny wzrost strumienia i prędkość obrotowa silnika praktycznie pozostaje stała.

Podstawowym sposobem regulacji prędkości obrotowej w silnikach prądu stałego jest zmiana napięcia zasilającego. Do tego celu musimy dysponować regulowanym źródłem napięcia stałego. Podobną charakterystykę regulacyjną $n = f(U)$ uzyskujemy przez załączenie rezystancji dodatkowej R_d w obwód twornika. Napięcie podawane na twornik silnika będzie wtedy pomniejszone o spadek napięcia na rezystancji dodatkowej wywołany przepływającym prądem. Wartość tego prądu zależy od obciążenia silnika. Przykładowy przebieg charakterystyk regulacyjnych otrzymanych przez regulację rezystancji dodatkowej włączanej w obwód twornika $n=f(U)$ przy stałym prądzie wzbudzenia i stałym momencie jest przedstawiony na rys. 3.8.



Rys.3.8. Charakterystyki regulacyjne $n = f(U)$ silnika bocznikowego przy $M = \text{const}$.

Przebieg tych charakterystyk jest w przybliżeniu liniowy, gdyż wzór (3.10) przy $\Phi = \text{const}$ ($I_w = \text{const}$) i $I_t = \text{const}$ opisuje równanie prostej.

Ponieważ istnieje oddziaływanie twornika zmniejszające strumień magnetyczny (szczególnie przy nasyconym obwodzie magnetycznym) w miarę obciążania maszyny, więc dla różnych obciążeń proste nie są do siebie równoległe (zmienia się we wzorze (3.11) współczynnik nachylenia prostych $1/c_E\Phi$). Proste przecinają oś odciętych w punktach U_0 . Napięcie U_0 jest w tym przypadku napięciem potrzebnym do tego, aby silnik był w stanie pokonać opory mechaniczne własne i sprzężonej z nim hamownicy w początkowej chwili rozruchu.

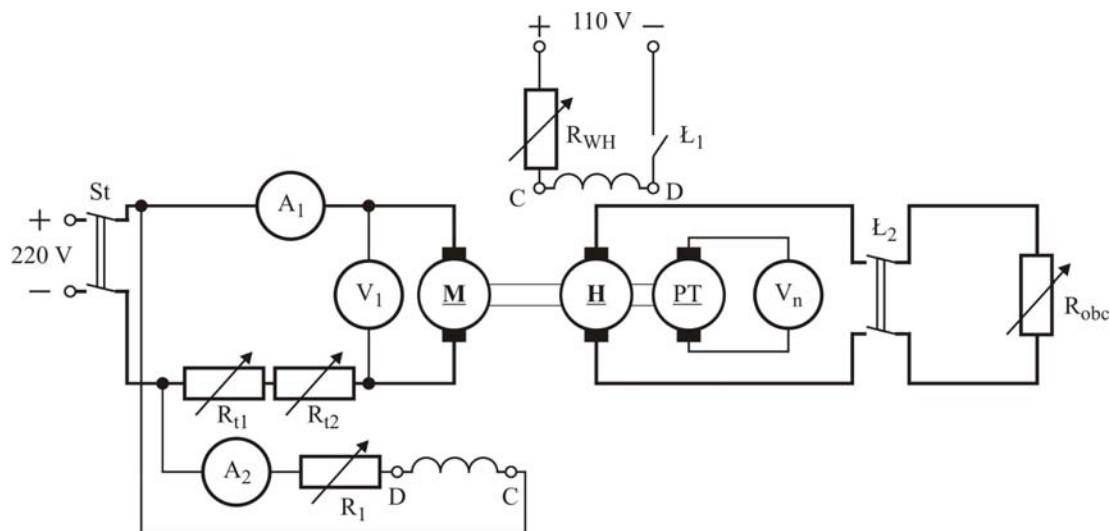
Praktycznie identyczny przebieg będą miały charakterystyki regulacyjne przy zmianie napięcia zasilającego.

3.5. Badania laboratoryjne

3.5.1 Pomiar charakterystyk roboczych

Z punktu widzenia wykorzystania silnika, podstawową jego charakterystyką roboczą jest charakterystyka mechaniczna. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego jest to zależność prędkości obrotowej wału n od momentu obrotowego M lub od prądu twornika I_t przy stałej wartości napięcia na zaciskach twornika U_t , równej napięciu znamionowemu oraz przy stałym prądzie wzbudzenia I_w równym prądowi znamionowemu: $n=f(M)$ lub $n=f(I_t)$ przy $U_t=const=U_N$, $I_w=const=I_{wN}$.

Schemat połączeń układu pomiarowego do pomiaru zarówno charakterystyk roboczych jak i regulacyjnych przedstawiony jest na rys.3.9.



Rys. 3.9. Schemat układu pomiarowego do badania silnika bocznikowego.

Do obciążania silnika M wykorzystywana jest hamownica maszynowa H . Jest to prądnica obcowzbudna prądu stałego z łożyskowanym stojanem. Uzwojenie wzbudzenia prądnicy zasilane jest z dodatkowego źródła napięcia stałego, a w obwód twornika włączamy odbiornik o regulowanej rezystancji. Zmianę momentu hamującego uzyskujemy przez regulację prądu wzbudzenia i prądu twornika pobieranego z prądnicy. Zgodnie z trzecim prawem dynamiki moment hamujący twornika przekazywany jest na łożyskowany stojan, który wychyla się wskazując wartość momentu hamującego. Prędkość obrotową mierzymy prądnicą tachometryczną prądu stałego PT , której napięcie wyjściowe, jakie pokazuje woltomierz V_n jest proporcjonalne do prędkości obrotowej.

Po wykonaniu i sprawdzeniu połączeń układu pomiarowego należy przystąpić do uruchomienia silnika. Przed podaniem napięcia na twornik przez zamknięcie stycznika St należy się upewnić, czy rezystory włączone w obwód twornika (R_{t1} , R_{t2}) są ustawione na maksymalną rezystancję (spełniają one rolę rozrusznika) oraz czy rezystor w obwodzie wzbudzenia (R_l) jest zwarty (popłynie wtedy duży prąd wzbudzenia wytwarzając duży strumień magnetyczny).

Po zamknięciu stycznika St należy płynnie zmniejszać rezystancję w obwodzie twornika, aż do całkowitego zwarcia rezystorów. Rezystory w obwodzie twornika należy zwierać płynnie i powoli, aby nie dopuścić do zbyt dużego wzrostu prądu twornika w trakcie rozruchu. W miarę zwierania rezystorów prędkość obrotowa silnika rośnie osiągając po rozruchu największą wartość.

Po zakończeniu rozruchu należy najpierw rezystorem R_l ustawić znamionowy prąd wzbudzenia silnika, a następnie przystąpić do pomiarów.

Silnik obciąża się hamownicą maszynową od biegu jałowego do momentu $M = 1,2 M_N$ (M_N oznacza moment znamionowy) lub prądu twornika do $I_t = 1,2 I_{tN}$. Łączniki hamownicy \mathbb{L}_1 i \mathbb{L}_2 zamykamy i otwieramy przy maksymalnych rezystancjach R_{obc} i R_{wH} . Po zamknięciu łączników w pierwszej kolejności zwieramy rezystory w obwodzie wzbudzenia hamownicy, a następnie w obwodzie twornika hamownicy zwiększając w ten sposób prąd obciążenia silnika do wymaganej wartości. W czasie pomiaru należy utrzymywać stałą wartość prądu wzbudzenia I_{wN} oraz napięcia zasilającego U_{tN} . Należy wykonać około 10 pomiarów. Otrzymane wyniki wpisać do tabeli 3.1.

Tab. 3.1

$I_w = \text{const} = I_{wN} = \dots\dots\dots\text{A}, U_t = \text{const} = U_N = \dots\dots\dots\text{V}$								
Lp.	Pomiary			Obliczenia				
	I_t	n	M	ω	I	P_1	P_2	η
	A	obr/min.	Nm	rad/s	A	W	W	%
1.								
2.								
3.								
...								

Obliczenia wykonać korzystając z następujących zależności:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \text{ - prędkość kątowna wału;}$$

$$I = I_t + I_w \text{ - całkowity prąd pobierany przez silnik;}$$

$$P_1 = I \cdot U_t \text{ - moc pobierana przez silnik;}$$

$$P_2 = M \cdot \omega \text{ - moc na wale silnika;}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \text{ - sprawność silnika wyrażona w procentach.}$$

Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń należy wykreślić zależności n , I_t oraz $\eta = f(M)$ w jednym układzie współrzędnych. Typowy kształt charakterystyki mechanicznej jest pokazany na rys.3.5, a wszystkich charakterystyk roboczych na rys.3.6. Uzasadnienie przebiegów tych charakterystyk przedstawiono w punkcie 3.3.

3.5.2 Pomiar charakterystyk regulacyjnych

Charakterystyki $n = f(I_w)$

Jedną z charakterystyk regulacyjnych jest zależność prędkości obrotowej silnika n od prądu wzbudzenia I_w przy stałym napięciu na zaciskach twornika $U_t = \text{const} = U_N$, i stałym momencie obciążenia $M = \text{const}$ lub prądzie twornika $I_t = \text{const}$.

Układ połączeń do pomiaru tej charakterystyki jest przedstawiony na rysunku 3.9. Pomiar przeprowadza się przy biegu jałowym oraz przy stałym momencie obciążenia (ustalonym z prowadzącym zajęcia), zmieniając prąd wzbudzenia I_w od wartości maksymalnej (rezystor R_l zwarty) do takiej wartości, przy której prędkość obrotowa nie przekracza 1,2 prędkości znamionowej n_N . W czasie pomiarów przy obciążeniu należy utrzymywać stałe obciążenie. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 3.2.

Tab.3.2

$U_t = \text{const} = U_N = \dots\dots\dots V$				
Lp.	$M = 0 \text{ Nm}$		$M = \text{const} = \text{ Nm}$	
	I_w	n	I_w	n
	A	obr/min	A	obr/min
1.				
2.				
3.				
...				

Wartość momentu znamionowego M_N można określić z danych znamionowych silnika badanego zgodnie ze wzorem

$$M_N = \frac{P_N \cdot 60}{2\pi \cdot n_N}$$

gdzie:

P_N – znamionowa moc silnika [W]

n_N – znamionowa prędkość obrotowa [obr/min]

Na podstawie wyników pomiarów należy wykreślić zależności $n=f(I_w)$. Przykładowe przebiegi tych charakterystyk przedstawione są na rys. 3.7, a uzasadnienie ich przebiegu w punkcie 3.4.

Charakterystyki $n=f(U_t)$

Zależność prędkości obrotowej od napięcia przyłączonego do zacisków twornika lub od rezystancji dodatkowej włączonej w obwód twornika przy stałym znamionowym prądzie wzbudzenia I_{wN} i stałym momencie M lub prądzie obciążenia I_t ma w zasadzie identyczny przebieg. Różnica polega tylko na tym, że na dodatkowej rezystancji tracona jest moc zmniejszająca sprawność układu regulacyjnego. Metoda takiej regulacji prędkości silnika prądu stałego jest więc nieekonomiczna i na skalę przemysłową nie stosowana.

W ćwiczeniu zmianę napięcia zasilania twornika uzyskujemy poprzez włączenie w obwód twornika dodatkowej rezystancji R_d . Rezystory należy dobrać tak, aby przy pomiarach nie przekraczać ich dopuszczalnego prądu (szczególnie dotyczy to pomiarów przy stałym momencie obciążenia).

Tab. 3.3

$I_w = \text{const} = I_{wN} = \dots\dots\dots A$				
Lp.	$M = 0 \text{ Nm}$		$M = \text{const} = \dots\dots\dots \text{Nm}$	
	U_t	n	U	n
	V	obr/min	V	obr/min
1.				
2.				
3.				
...				

Pomiary wykonujemy (w układzie pomiarowym z rys.3.9) przy biegu jałowym $M=0$, i przy obciążeniu np. $M=0,5M_N$ (lub $I_t=0,5I_{tN}$). Napięcie należy zmieniać poczynając od

wartości znamionowej, a kończąc na takiej wartości napięcia, przy której hamownica maszynowa jest jeszcze w stanie obciążyć silnik właściwym momentem. Przez cały czas trwania pomiarów należy utrzymywać znamionowy prąd wzbudzenia silnika I_{wN} . Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 3.3.

Na podstawie wyników pomiarów należy wykreślić zależności $n=f(U)$. Przykładowe przebiegi tych charakterystyk przedstawione są na rys. 3.8, a uzasadnienie ich przebiegu w punkcie 3.4.