



Politechnika Wroclawska

---

Ćwiczenie 3

Wydział

Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

LABORATORIUM  
PODSTAW ELEKTROTECHNIKI

Badanie silnika bocznikowego prądu stałego

### **Zagadnienia do przygotowania**

- Urządzenia przeznaczone do pomiarów DC.
- Silnik bocznikowy zasada działania.
- Co to jest komutator?
- Sposoby sterowania pracą silnika.
- Zasada doboru poszczególnych elementów sterowania silnikiem.
- Podstawowe charakterystyki silnika.

### **Literatura**

- [1] B. Karolewski, Z. Okraszewski, A. Szymański „Elektrotechnika Ćwiczenia laboratoryjne dla wydziałów nieelektrycznych. Skrypt PWr
- [2] Bogdan Miedziński „ELEKTROTECHNIKA Podstawy i instalacje elektryczne”  
wydawnictwo WNT

Podstawowym celem ćwiczenia jest poznanie właściwości ruchowych silnika bocznikowego prądu stałego ze szczególnym uwzględnieniem rozruchu i regulacji prędkości obrotowej. Na podstawie pomiarów wyznacza się podstawowe charakterystyki silnika umożliwiające ocenę jego możliwości eksploatacyjnych. Program ćwiczenia obejmuje wyznaczenie:

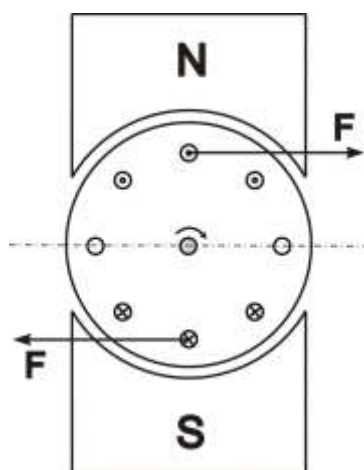
- a) charakterystyki mechanicznej  $M = f(n)$ ,
- b) charakterystyki  $n = f(I)$ ,
- c) charakterystyki  $n = f(R_t + R_d)$ .

### 1.1. Wprowadzenie

Maszyna prądu stałego pracuje, jako silnik, gdy uzwojenie wzbudzenia oraz uzwojenie wirnika zasilane są z sieci (przyjmuje się, w odróżnieniu od maszyn prądu przemiennego, iż w maszynach prądu stałego *twornikiem jest wirnik* natomiast *stojan przejmuje funkcję magnesu*). W stojanie uzwojenie wzbudzenia wytwarza pole magnetyczne o indukcji  $B$  i oddziałuje ono na znajdujące się w tym polu uzwojenie wirnika, przez które przepływa  $I_t$  prąd wirnika. W takim układzie obserwujemy działanie siły mechanicznej  $F$  określonej wzorem:

$$F = BI_t l, \quad (1.1)$$

$l$  – długość przewodów uzwojenia wirnika.



Rys. 1.1. Siły działające na pręty uzwojeń wirnika.

Moment elektromagnetyczny  $H$  powodujący ruch obrotowy wirnika (rys. 1.1) powstaje pod wpływem wszystkich sił działających na równomiernie rozłożone na obwodzie przewody uzwojenia wirnika. Gdy odległość przewodu od osi obrotu wynosi  $r$ , moment elektromagnetyczny

wyraża zależność: [1]

$$M = r \sum F \quad (1.2)$$

Stosując równania (1.1) i (1.2) z uwzględnieniem charakterystycznych parametrów konstrukcyjnych maszyny możemy wyprowadzić wzór określający moment elektromagnetyczny silnika:

$$M = C_1 \Phi I_t \quad (1.3)$$

Moment na wale silnika, przekazywany maszynie napędzanej jest mniejszy od momentu elektromagnetycznego o wartość tzw. momentu strat, niezbędnego na pokonanie mechanicznych oporów wewnętrznych (tarcie, przewietrzanie).

W wirujących z prędkością obrotową  $n$  przewodach wirnika zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej indukuje się siła elektromotoryczna  $E$  określoną wzorem

$$E = C_2 \Phi n \quad (5.4)$$

Pod wpływem spadku napięcia na rezystancji uzwojenia wirnika siła elektromotoryczna równoważy napięcie w sieci  $U$ , zgodnie z schematem pokazanym na rys. 1.2.

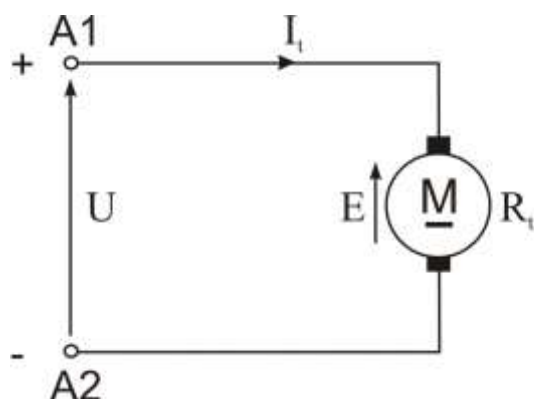
Stosując drugie prawo Kirchhoffa można napisać, że:

$$U = E + R_t I_t \quad (5.5)$$

$R_t$  - całkowita rezystancja obwodu wirnika.

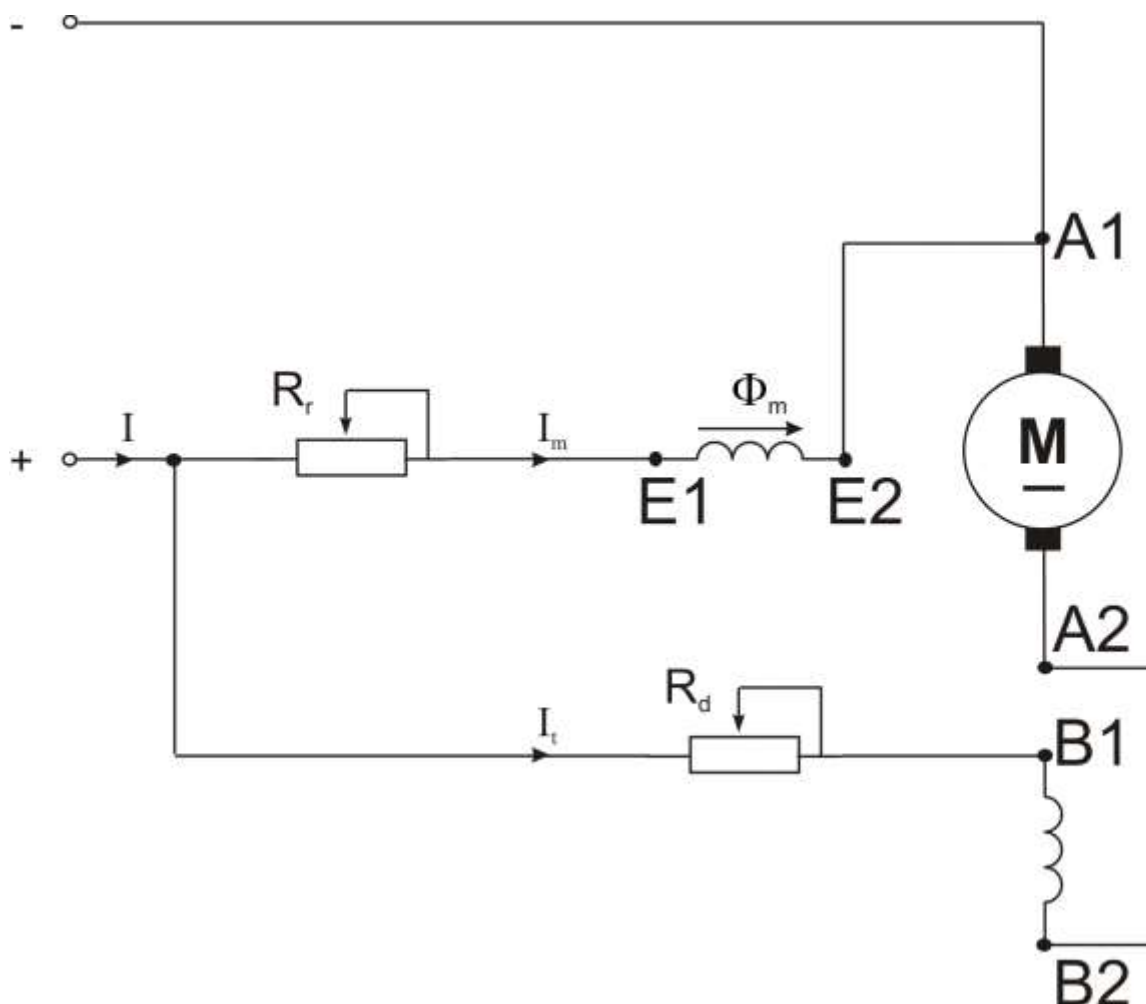
Następnie po uwzględnieniu zależności (5.4) otrzymuje się prędkość obrotową w postaci:

$$n = \frac{U - R_t I_t}{C_2 \Phi} \quad (5.6)$$



Rys. 1.2. Schemat połączeń obwodu wirnika silnika prądu stałego. [1]

Silnik bocznikowy, charakteryzują się tym, że jego uzwojenie wzbudzenia jest połączone równoległe do obwodu wirnika ( zgodnie z rys. 1.3). Do regulacji prądu wzbudzenia  $I_m$  w obwodzie wzbudzenia stosuje się rezystor regulacyjny  $R_r$ . Natomiast rezystor dodatkowy  $R_d$ , służy przede wszystkim do ograniczenia wartości prądu rozruchowego lub niekiedy do regulacji prędkości obrotowej i znajduje się w obwodzie wirnika. [1]



Rys. 1.3. Schemat połączeń silnika bocznikowego prądu stałego.

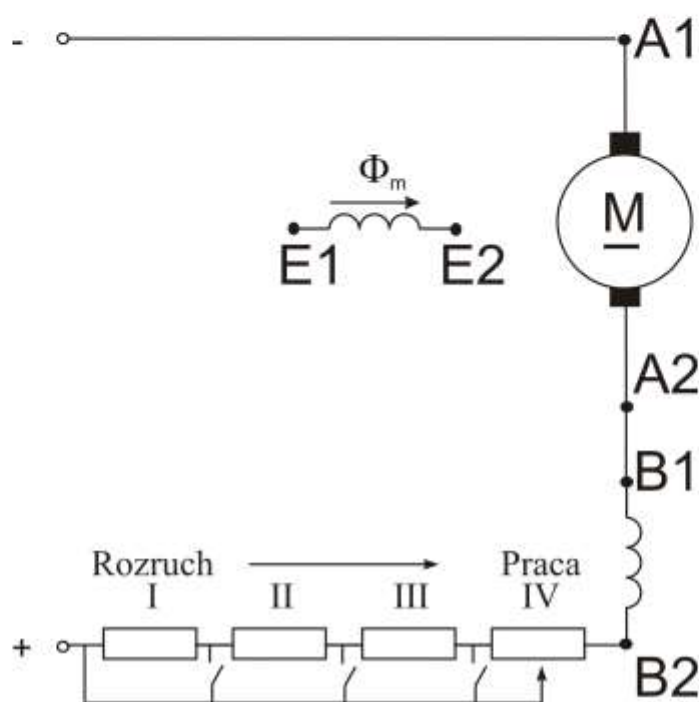
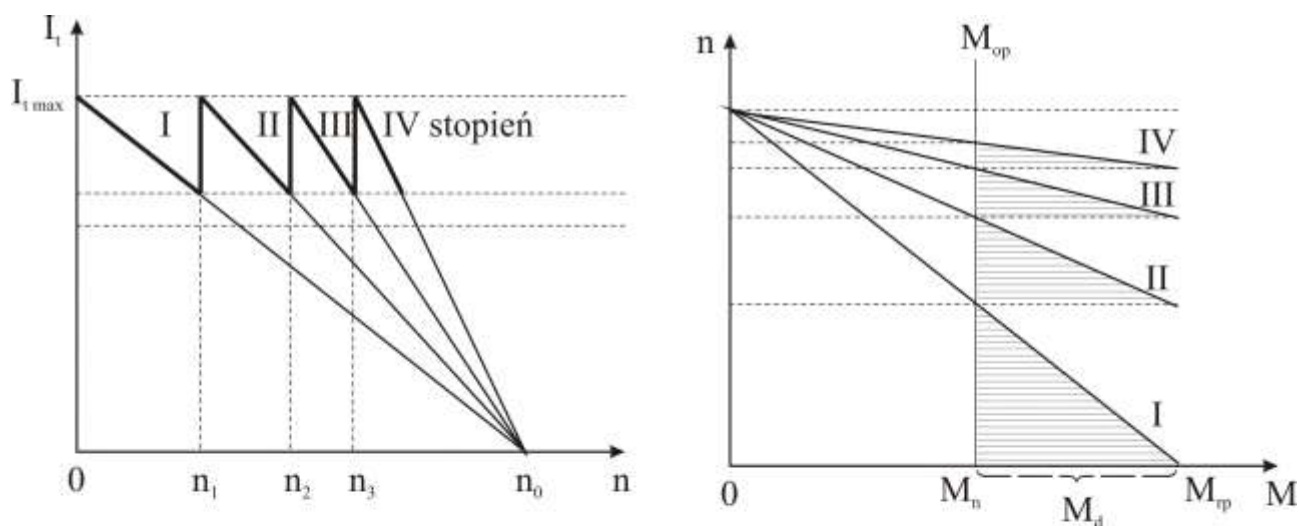
W silnikach bocznikowych dąży się do zapewnienia stałej wartości prądu wzbudzenia, otrzymując w ten sposób stały strumień  $\Phi$ . Pomijając wpływ oddziaływania strumienia poprzecznego wirnika, można przyjąć, (zgodnie z 1.3) że zależność  $M=f(I_r)$  jest *linią prostą*.

Moment rozruchowy  $M_r$  wytwarzany jest podczas rozruchu silnika, którego wartość zależy od wartości prądu w chwili włączenia silnika do sieci, gdy wirnik jest nieruchomy. Siła elektromotoryczna równa jest wtedy zero, prąd płynący przez uzwojenie wirnika jest zależny od rezystancji uzwojenia wirnika i wartości napięcia sieci, można go zapisać wzorem:

$$I_r = \frac{U}{R_r} \quad (1.7)$$

Mała wartość rezystancji wirnika wpływająca na prąd płynący w chwili rozruchu powoduje, że jest on bardzo duży oraz osiąga wartości większe od prądu znamionowego wirnika. Jest to około **20-krotność** tego prądu. Tak duży prąd mógłby spowodować skutki cieplne i uszkodzić uzwojenia wirnika. Więc w celu ograniczenia tego prądu w obwód wirnika włącza się dodatkowe rezystory rozruchowe o odpowiednio dobranych wartościach rezystancji, dobranych tak, aby prąd rozruchowy nie przekroczył **2-krotnej** wartości prądu znamionowego silnika.

$$I_r = \frac{U}{R_r + R_d} \leq 2I_n \quad (1.8)$$



Rys. 1.4. Rozruch silnika bocznikowego prądu stałego z widocznymi stopniami rezystancji rozruchowej; a - charakterystyka prądu rozruchowego od prędkości obrotowej, b - charakterystyka mechaniczna.

Rezystor rozruchowy  $R_{roz}$ , zwany dość często rozrusznikiem, może być wykonany z kilku połączonych szeregowo rezystorów i ma zwykle kilka stopni rozruchowych, których automatycznie sterowane wyłączenie odbywa się z wykorzystaniem przekaźników czasowych. Przed rozruchem należy sprawdzić czy rezystor dodatkowy  $R_d$  włączony do obwodu wirnika ma **maksymalną wartość rezystancji**. W miarę narastania prędkości obrotowej i zmniejszającego się prądu płynącego w obwodzie wirnika należy stopniowo zmniejszać wartość rezystancji rozrusznika (przez

kolejne stopnie), do zera, tak jak pokazano to na rys. 1.4.

Podczas włączenia maksymalnej rezystancji rozrusznika silnik pracuje na charakterystyce I:

$$n = \frac{U}{C_2 \Phi} - \frac{R_t + R_d}{C_1 C_2 \Phi^2} \quad (1.9)$$

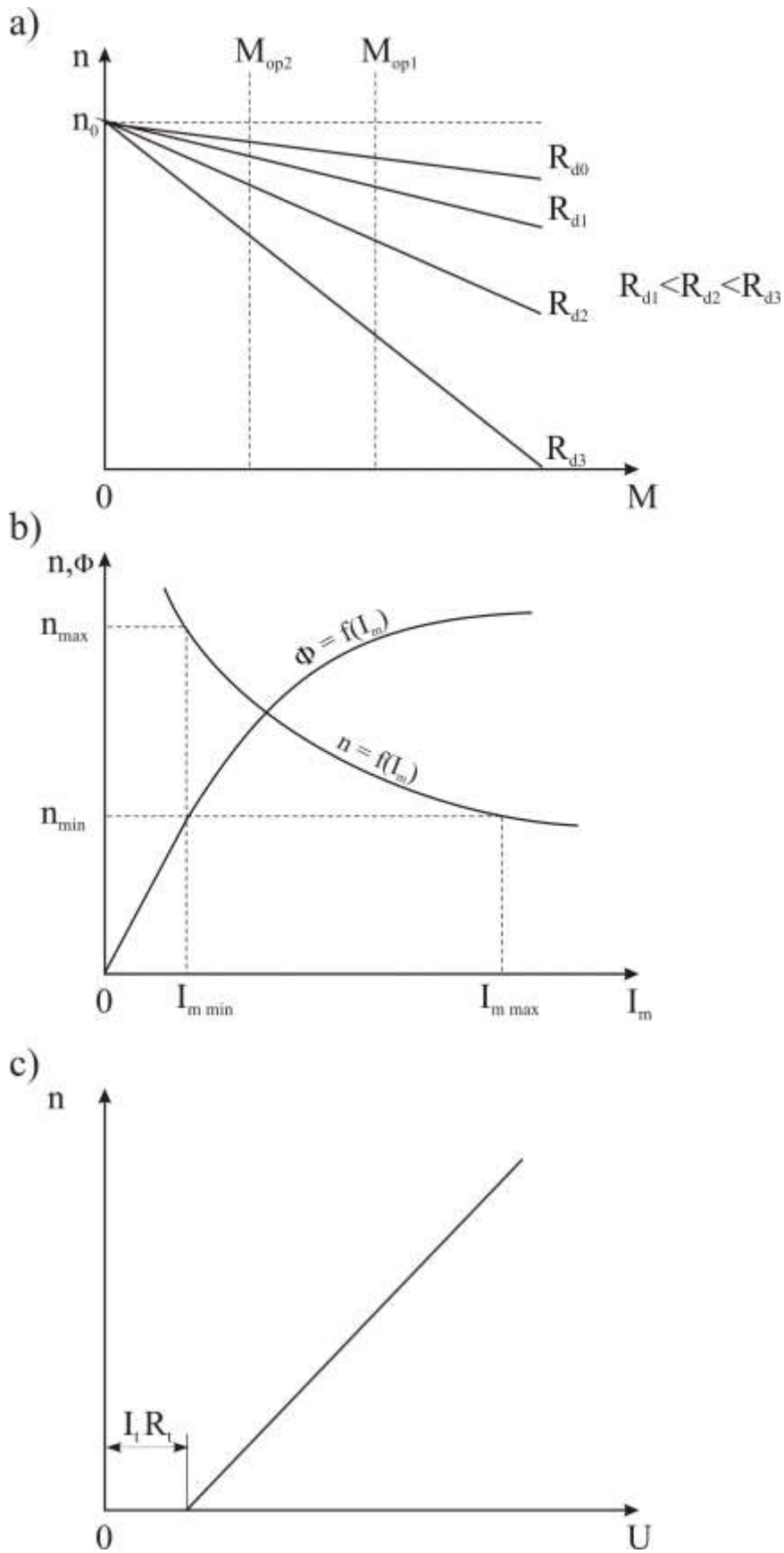
Różnica momentów, silnika  $M$  i maszyny napędzanej  $M_n$ , zwanej momentem dynamicznym  $M_d$ , powoduje, że silnik rusza i przyspiesza. Wartość przyspieszenia kątownego  $\varepsilon$  jest proporcjonalna do wartości momentu dynamicznego i odwrotnie proporcjonalna do momentu bezwładności  $J$  wirującego układu napędowego, co opisuje równanie: [1]

$$\varepsilon = \frac{M_d}{J} \quad (5.10)$$

Rozruch silnika bardzo często automatyzuje się poprzez zastosowanie układu sterowania przekaźnikowo-styczniovego wpływając automatycznie na:

- wartości rezystancji,
- strumień magnetyczny,
- napięcie zasilania uzwojenia twornika.





Rys. 1.5. Sposoby regulacji prędkości obrotowej silnika prądu stałego: a) - przez rezystancje  $R_t$  obwodu twornika, b) - zmianę strumienia magnetycznego, c) - zmianę napięcia zasilającego uzwojenia twornika. [1]

Po rozruchu docelowym stanem pracy silnika jest praca normalna (znamionowa) z możliwością regulacji prędkości obrotowej, wynika to bezpośrednio z zależności (1.6), z uwzględnieniem rezystora dodatkowego w obwodzie wirnika. Poprzez zastosowanie rezystora dodatkowego (o odpowiedniej wartości prądu i z zapewnieniem odpowiednich warunków chłodzenia, czyli przystosowanego do pracy ciągłej) w obwód wirnika otrzymuje się rodzinę charakterystyk mechanicznych sztucznych (rys. 1.5a). Od momentu hamującego, obciążającego silnik zależy możliwy zakres regulacji prędkości obrotowej. Zmiany obciążenia mogą wpływać w tym przypadku na duże zmiany prędkości obrotowej.

Zmiana wartości prądu płynącego w obwodzie wzbudzenia wpływa na zmianę strumienia magnetycznego  $\Phi$ . Jest to tzw., regulacja w górę i wiąże się ona ze wzrostem prędkości obrotowej. Znamionowa wartość prądu wzbudzenia odpowiada najmniejszej wartości prędkości obrotowej. Zwiększanie wartości rezystancji rezystora  $R_r$  wpływa na to, iż w każdym przypadku zmniejsza strumień magnetyczny, więc i wzrost prędkości obrotowej (rys. 1.5b). Największy możliwy w praktyce do osiągnięcia stosunek prędkości obrotowej maksymalnej i minimalnej wynosi ok. 3 i opisuje zakres regulacji prędkości obrotowej. Regulacja prędkości obrotowej silnika przez zmianę strumienia magnetycznego jest regulacją ekonomiczną, gdyż straty energii w rezystorze regulacyjnym są stosunkowo małe w odniesieniu do mocy silnika. [1]

Regulację prędkości obrotowej wykonuje się także poprzez zmianę napięcia zasilającego wirnik silnika bocznikowego. Do realizacji tego sposobu regulacji jest niezbędne źródło prądu stałego o regulowanym napięciu. Dotychczas stosowano do tego celu prądnice prądu stałego o regulowanym wzbudzeniu (np. Układ Leonarda), a obecnie prostowniki sterowane tyrystorowo. Przy niezmiennym obciążeniu i stałym wzbudzeniu silnika zależność  $n=f(U)$  jest linią prostą (rys. 1.5c).

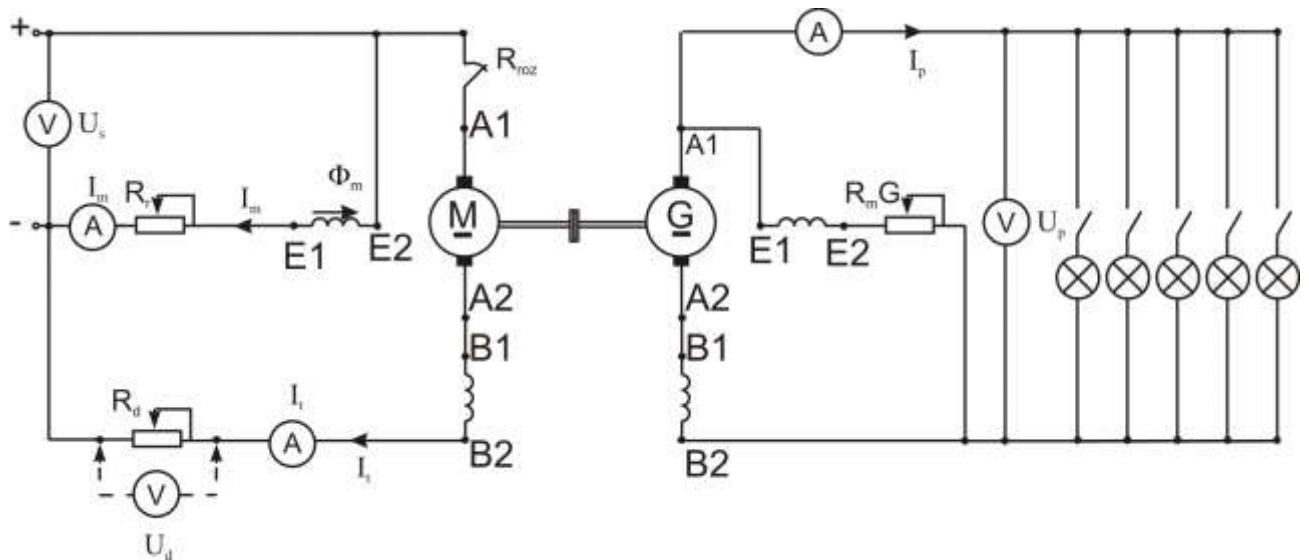
## 1.2. Program ćwiczenia i sposób jego wykonania

### 1.2.1. Wyznaczenie charakterystyki mechanicznej $M=f(n)$ .

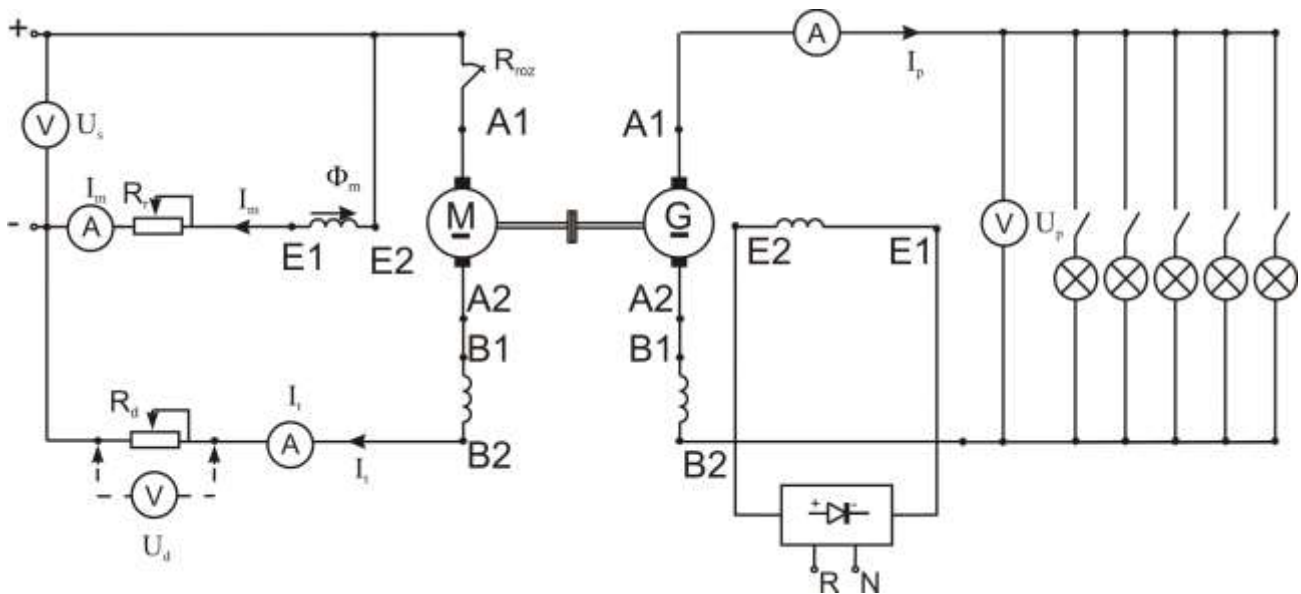
Zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.6 lub 1.7 połączyć układ pomiarowy i dokonać rozruchu silnika. Po zakończeniu rozruchu silnika należy wzbudzić prądnicę prądu stałego do napięcia  $U_n$ , zadaniem prądnicy w tym układzie jest obciążenie silnika W układzie samowzbudnym regulacja odbywa się poprzez zastosowanie rezystora  $R_mG$ , natomiast w układzie obcowzbudnym układ prostowniczy zasilamy napięciem regulowanym. Następnie kolejno włączanymi żarówkami

zwiększamy obciążenie prądnicy (należy wykonać minimum 8 pomiarów). Wyniki pomiarów i obliczeń należy zebrać w tab. 1.1.

Uwaga: Na zaciskach prądnicy podczas pomiarów utrzymujemy napięcie o stałej wartości, zgodnej z tabliczką znamionową prądnicy ( $U_n=220V$ ). Dobór rezystorów  $R_r$  oraz  $R_d$  zależy od parametrów znamionowych maszyny (przykładowo do zestawu laboratoryjnego należy dobrać rezystory przykładowo o wartościach  $R_r=700 \Omega$  oraz  $R_d=40 \Omega$ , pamiętając o ich prądzie znamionowym obciążenia).



Rys. 1.6. Układ pomiarowy do badania charakterystyk ruchowych silnika bocznikowego prądu stałego z prądnicą prądu stałego pracującej w układzie samowzbudnym. [1]



Rys. 1.7. Układ pomiarowy do badania charakterystyk ruchowych silnika bocznikowego prądu stałego z prądnicą prądu stałego pracującej w układzie obcowzbudnym. [2]

Tabela 1.1

Lp.:	Liczba żarówek	$U_s$	$I_t$	$I_m$	$U_p$	$I_p$	$n$	$P_s$	$P_p$	$\eta_s$	$M$
		[V]	[A]	[A]	[V]	[A]	$\left[\frac{\text{obr}}{\text{min}}\right]$	[W]	[W]	[-]	[N·m]
1	0										
2	1										
3	...										

Obliczyć wielkości niezbędne do wyznaczenia charakterystyki mechanicznej z zależności:

- moc pobieraną przez silnik  $P_s = (I_t + I_m)U_s$  [W]

- moc pobieraną przez prądnicę  $P_p = U_p I_p$  [W]

- sprawność silnika  $\eta_s = \sqrt{\frac{P_p}{P_s}}$

- moment obrotowy silnika na wale  $M = 9,55 \frac{P_s \eta_s}{n}$  [Nm] [1]

Uwaga

Współczynnik 9,55 wynika z wzoru  $\left[\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot 60\right]$ , dlatego obroty  $n$  podajemy w jednostkach  $\left[\frac{\text{obr}}{\text{min}}\right]$

(RPM- *revolutions per minute* - obroty na minutę).

Po zakończeniu pomiarów w pierwszej kolejności obniżamy napięcie na zaciskach prądnicy do wartości ok. 110V i kolejno wyłączamy żarówki.

### 1.2.2. Wyznaczanie charakterystyki $n = f(I_m)$

Stosując ten samym układ pomiarowy jak w punkcie 1.2.1 obciążyc prądnicę 4 lub 6 żarówkami, przy napięciu 160V. Warunkiem poprawności wykonania pomiarów jest utrzymywanie stałego obciążenia prądnicy i równomierna regulacja rezystorem  $R_r$  wartość prądu wzbudzenia. Podczas pomiarów odczytujemy odpowiadającą punktom regulacji wartości prędkości obrotowej. W ćwiczeniu wykonać minimum 8 pomiarów. Wyniki zestawić w tab. 1.2.

Tabela 1.2

Lp.: Wielkości mierzone		1	2	3	4	5	6	7	8
		$I_m$	[A]						
n	$\left[ \frac{obr}{min} \right]$								

Sporządzić wykres  $n=f(I_m)$ .

### 1.2.3. Wyznaczanie charakterystyki $n = f(R_t+R_d)$

W tym samym układzie połączeń jak w punkcie 1.2.1 odciążyć prądnicę nie załączając żadnej żarówki, przy napięciu 150V. Przez cały czas pomiarów utrzymuje się bieg jałowy prądnicy i reguluje rezystorem  $R_d$ , wartość prądu wzbudzenia  $I_m=const$ . Podczas pomiarów dokonuje się odczytu prądu twornika  $I_t$  i napięcia  $U_d$  (do układu należy dołączyć dodatkowy woltomierz) oraz równocześnie odczytuje odpowiadającą tym wartościom prędkość obrotową. W ćwiczeniu wykonać minimum 8 pomiarów. Wyniki zestawić w tab. 1.3.

Tabela 1.3

Lp.: Wielkości mierzone		1	2	3	4	5	6	7	8
		$I_m$	[A]						
$U_s$	[V]								
$I_t$	[A]								
$U_d$	[V]								
n	$\left[ \frac{obr}{min} \right]$								
$R_t+R_d$	[Ω]								

Sporządzić wykres  $n=f(R_t+R_d)$ .