

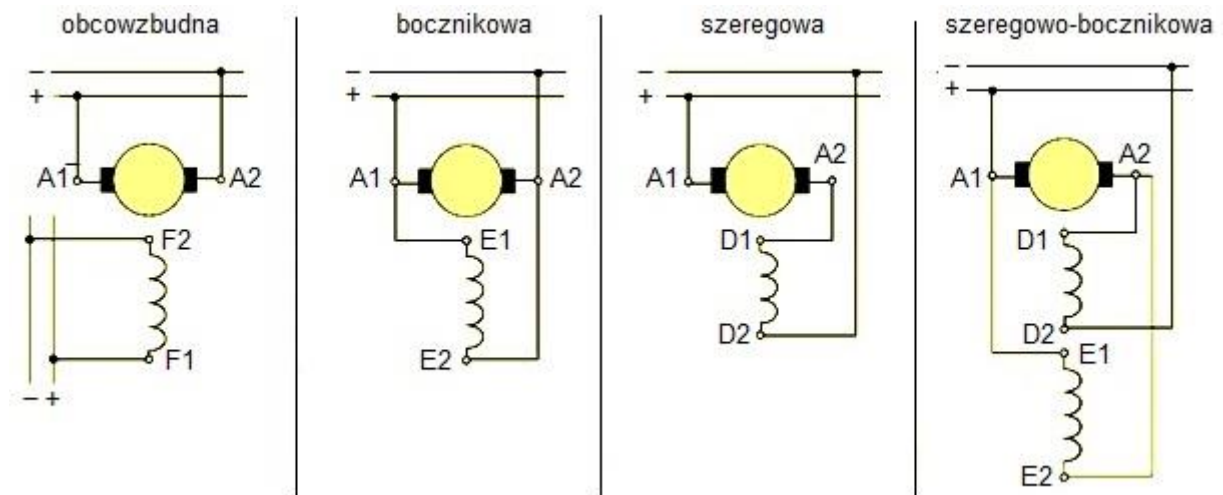
MASZYNY PRĄDU STAŁEGO

Sposób połączenia uzwojenia wzbudzenia względem uzwojenia twornika decyduje o właściwościach maszyny prądu stałego.

Silniki prądu stałego charakteryzują się dobrymi właściwościami ruchowymi np. dużym zakresem prędkości obrotowej i dużym momentem obrotowym przy rozruchu. Ich własności użytkowe zależą od liczby i sposobu połączenia uzwojeń wzbudzających.

Ze względu na sposób połączenia uzwojenia wzbudzającego i uzwojenia twornika, rozróżnia się maszyny samowzbudne (Rys. 4):

- **bocznikowe**, uzwojenie wzbudzające jest połączone równoległe z uzwojeniem twornika;
- **szeregowe**, uzwojenie wzbudzające jest połączone szeregowo z uzwojeniem twornika;
- **bocznikowo-szeregowe**, uzwojenie wzbudzające składa się z dwóch części, z których jedna jest połączona szeregowo, a druga równoległe z uzwojeniem twornika.



Rys. 4. Uprozczone schematy połączeń uzwojeń silników prądu stałego

Uzwojenie biegunów komutacyjnych (pomocniczych) połączone jest szeregowo na stałe z twornikiem, a punkt połączenia nie jest wyprowadzony na zewnątrz silnika. Po przyłączeniu silnika do zasilania, poprzez szczotki i uzwojenie wirnika, płynie prąd. Uzwojenie to znajduje się w polu magnetycznym uzwojenia stojana, które oddziałując siłą elektrodynamiczną na pręty uzwojenia twornika, powoduje wprowadzenie wirnika w ruch obrotowy.

Zastosowanie przekształtników umożliwia zasilanie i regulację silników prądu stałego z sieci prądu przemiennego, co zwiększa ich konkurencyjność wobec urządzeń napędowych z silnikami prądu przemiennego.

W większych maszynach prądu stałego znajdują się tzw. uzwojenia pomocnicze połączone szeregowo z uzwojeniem twornika, służące do poprawy warunków pracy maszyny. Są to:

- **uzwojenia komutacyjne,**
- **uzwojenia kompensacyjne.**

Charakterystyki silników prądu stałego

Właściwości ruchowe silników prądu stałego można przedstawić za pomocą:

- charakterystyk mechanicznych silnika prądu stałego $n = f(I)$ lub $n = f(M)$ przy $U = \text{const}$ i $R_f = \text{const}$ oraz
- charakterystyk momentu silnika prądu stałego $M = f(I)$ przy $U = \text{const}$ i $R_f = \text{const}$

Silniki obcowzbudne wymagają niezależnego źródła do zasilania uzwojenia wzbudzającego. Znajdują często zastosowanie w układach napędowych z przekształtnikami tyrystorowymi.

Właściwościami ruchowe ogólnie dla wszystkich typów maszyn prądu stałego można określić na podstawie następujących zależności:

$$M = c \Phi I_a$$

gdzie: $I_a = \frac{U - E}{\sum R_a}$

$$U = E + R_a I_a$$

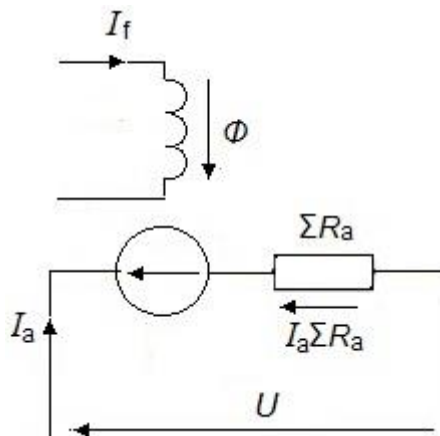
$$U = c \Phi n + R_a I_a$$

stąd prędkość obrotową silnika wynosi:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c \Phi}$$

1) Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego

W silniku bocznikowym uzwojenie wzbudzające jest połączone równolegle z uzwojeniem twornika i zasilane napięciem sieci (Rys. 4).



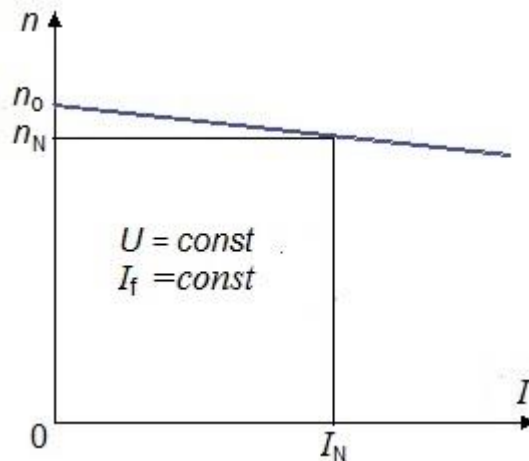
Rys. 5. Silnik bocznikowy

Charakterystyki mechaniczne silnika bocznikowego wyznacza się przy $U = \text{const}$ i $R = \text{const}$ (prąd wzbudzenia jest stały). Prędkość obrotową silnika n można wyznaczyć, z pominięciem oddziaływania twornika, jako przebieg w przybliżeniu prostoliniowy, w postaci:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E \Phi} I_a$$

po przekształceniu:

$$n = n_0 - k M$$



Rys. 5a Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego

W przypadku maszyny bocznikowej, przy pominięciu oddziaływania twornika można przyjąć, że wartość strumienia magnetycznego Φ jest proporcjonalna do prądu, a wzór na moment ma postać:

$$M = c_M \Phi I_a \text{ lub po przekształceniu } M \approx c_1 I_a$$

Przy rozpatrywaniu pracy napędów elektrycznych bardziej przydatna jest zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia, czyli charakterystyka $n = f(M)$ przy $U = \text{const}$ i $R_a = \text{const}$. Przebieg tej charakterystyki w przypadku silnika bocznikowego jest taki sam, jak dla przebiegu zależności $n = f(I)$.

2) Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego

Uzwojenie wzbudzające w silniku szeregowym jest połączone szeregowo z uzwojeniem twornika i uzwojeniem biegunów komutacyjnych (Rys. 4). Prąd pobierany z sieci jest jednocześnie prądem twornika i prądem wzbudzenia, czyli w przypadku silnika szeregowego: $I = I_a = I_f$.

Z tego względu właściwości ruchowe silników szeregowych różnią się od właściwości ruchowych silników bocznikowych. Strumień w silnikach szeregowych zależy od prądu obciążenia, (strumień Φ jest wprost proporcjonalny do prądu obciążenia I_a), natomiast wzrostowi momentu obciążenia odpowiada prąd obciążenia i wzrost strumienia - zgodnie z charakterystyką magnesowania.

Właściwości ruchowe silników szeregowych można również określić na podstawie następujących zależności:

$$M = c \Phi I_a$$

gdzie: $I_a = \frac{U - E}{\sum R_a}$

$$E = c \Phi n.$$

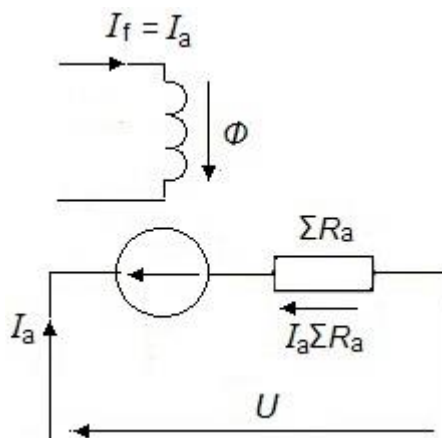
Na tej podstawie można wyznaczyć prędkość obrotową :

$$n = \frac{U}{\sqrt{c_2 M}} - \frac{\sum R_a}{c_2}$$

po przekształceniu:

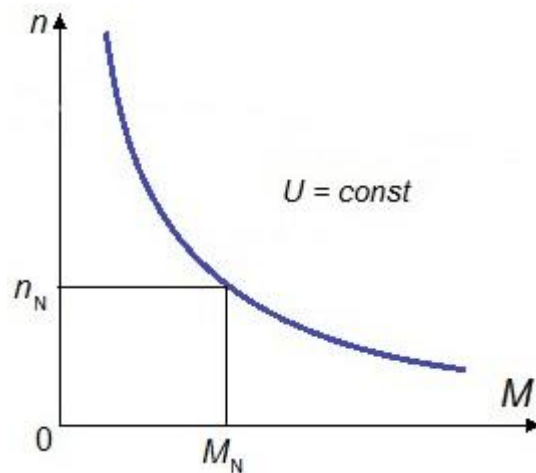
$$n = \frac{k_1}{\sqrt{M}} - k_2$$

Wynika stąd, że przy małym momencie M obciążenia prędkość obrotowa przybiera duże wartości, wirnik się rozbiega.



Rys. 6. Silnik szeregowy

Przy prędkościach zbliżonych do prędkości znamionowej można przyjąć, że charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego ma przebieg zbliżony do hiperboli (Rys. 6a)



Rys. 6a Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego

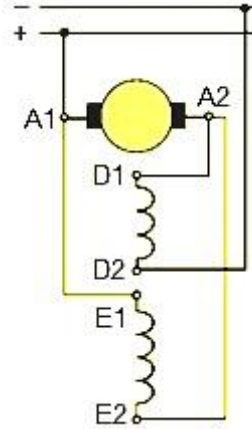
Przy zbyt małym obciążeniu na wale silnik szeregowy może osiągać niedopuszczalnie duże prędkości obrotowe (może się rozbiegać). Dlatego silniki te należy łączyć z napędzanymi przez nie maszynami za pomocą sprzęgieł nierozłącznych lub przekładni zębatej (nie powinno się stosować przekładni pasowych). Silniki szeregowy nie powinny pracować przy biegu jałowym. Możliwość rozbiegania się silnika jest jego wadą. Do zalet silnika szeregowego należy zaliczyć duży moment rozwijany podczas rozruchu $M_r = c I^2$, czyli moment jest wprost proporcjonalny do kwadratu prądu rozruchowego. Z tego właśnie względu silniki szeregowy mają zastosowanie w napędach wymagających rozruchu pod dużym obciążeniem.

3) Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowo-bocznikowego

Silnik szeregowo-bocznikowy składa się z dwóch uzwojeń wzbudzających: bocznikowego i szeregowego (Rys. 7).

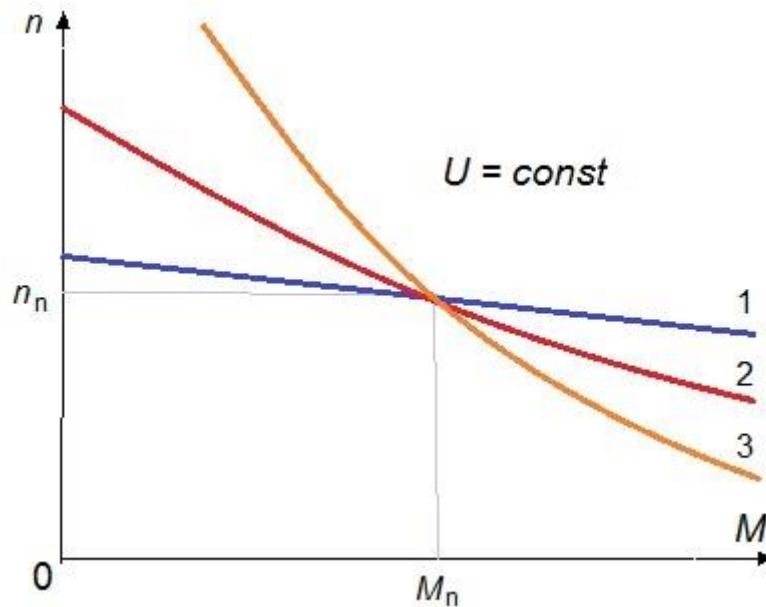
Właściwości silnika szeregowo-bocznikowego są zbliżone do silnika bocznikowego lub szeregowego, w zależności od ich przepływów.

Najczęściej stosuje się zgodne połączenie uzwojeń, to znaczy takie, że strumienie wytworzone przez uzwojenie bocznikowe i szeregowy dodają się, przy czym pierwszorzędą rolę odgrywa przepływ bocznikowy.



Rys.7. Silnik szeregowo-bocznikowy

Porównując charakterystyki mechaniczne silników (Rys. 7a): bocznikowego (1) i silnika szeregowego (3) i silnika szeregowo-bocznikowego (2), można stwierdzić, że silnik szeregowo-bocznikowy nie ma ujemnej cechy rozbiegania się w stanie jałowym, jaką miał silnik szeregowy, natomiast w porównaniu z charakterystyką silnika bocznikowego, silnik szeregowo-bocznikowy wykazuje duży moment rozruchowy.



Rys. 7a Charakterystyki mechaniczne

a) silnika bocznikowego, b) silnika szeregowo-bocznikowego, c) silnika szeregowego

Rozruch silników prądu stałego

W pierwszej chwili rozruchu, gdy prędkość silnika jest równa zero, siła elektromotoryczna $E = 0$, równanie napięć dla silnika prądu stałego $U = E + R_a I_a$ przyjmuje postać: $U = R_a I_a$.

Prąd rozruchowy pobierany przez silnik jest wielokrotnie większy od prądu znamionowego:

$$I_r = \frac{U}{R_r}$$

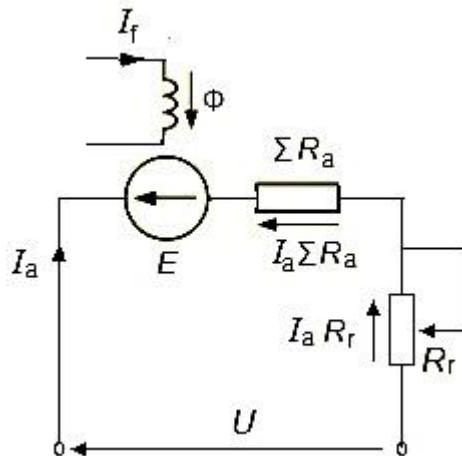
osiąga dużą wartość w porównaniu z prądem pobieranym w czasie pracy:

$$I_a = \frac{U - E}{\sum R_a}$$

Prąd twornika włączonego bezpośrednio na napięcie znamionowe może być bardzo duży (20 - 30 razy większy od znamionowego), co mogłoby doprowadzić do zniszczenia silnika. Celem jego ograniczenia w obwód twornika jest włączany, na czas rozruchu, rezystor R_r , zwany **rozrusznikiem**.

$$I_{\text{rozr}} = I_a = \frac{U}{\sum R_a + R_r}$$

Innym sposobem zmniejszania prądu rozruchowego jest załączenie twornika na obniżone napięcie.



Rys. 8. Rozruch silnika prądu stałego

Całkowitą rezystancję rozrusznika oblicza się ze wzoru:

$$R_{\text{roz}} \geq \frac{U_N}{I_{\text{roz}}} - \sum R_a$$

gdzie:

I_{roz} - dopuszczalny prąd twornika przy wymaganym rodzaju rozruchu;

U_N - napięcie znamionowe;

$\sum R_a$ - suma rezystancji w obwodzie twornika.

Sposoby rozruchu silnika prądu stałego

- a) rozruch za pomocą bezpośredniego włączenia do sieci - może być stosowany tylko do silników
małych, o mocy znamionowej nie większej niż 1 kW;
- b) rozruch za pomocą rozrusznika oporowego włączonego szeregowo w obwodzie twornika - może
być prowadzony przy wymaganym momencie oraz prądzie rozruchowym;
- c) rozruch silnika obcowzbudnego za pomocą regulowanego napięcia twornika; jest
powszechnie
stosowany dzięki rozwojowi sterowanych układów półprzewodnikowych.
- d) rozruch silnika szeregowego następuje za pomocą rozrusznika oporowego lub za pomocą
regulowanego napięcia zasilania.

Elektromagnetyczny moment obrotowy przy rozruchu zależy od wymagań napędowych i rezystancji rozrusznika; typowy silnik jest przystosowany przez wytwórcę do momentu rozruchowego nie mniejszego niż:

- a) silnik obcowzbudny - $1,8 M_N$
b) silnik bocznikowy - $1,8 M_N$
c) silnik bocznikowo-szeregowy - $2,0 M_N$
d) silnik szeregowy - $2,5 M_N$

Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego

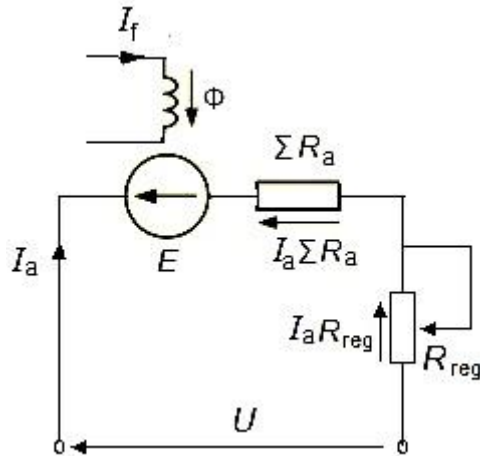
Prędkość obrotowa silnika prądu stałego z dodatkową rezystancją w obwodzie twornika R_r jest wyrażona wzorem:

$$n = \frac{U - I_a(\sum R_a + R_r)}{c\Phi}$$

Z zależności tej wynika, że prędkość obrotową silnika prądu stałego można regulować zmieniając:

- prąd wzbudzenia,
- napięcie zasilania twornika,
- rezystancję obwodu twornika, oraz
- strumień Φ .

Włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wzbudzenia powoduje zmniejszenie strumienia i przy określonym prądzie powoduje wzrost prędkości obrotowej. Zwiększa się przy tym prędkość biegu jałowego oraz nachylenie charakterystyki mechanicznej.



Rys. 9. Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Wymienione wyżej możliwości regulacji prędkości obrotowej różnią się od siebie pod względem:

- zakresu regulacji,
- kierunku regulacji (wzrost lub zmniejszenie prędkości obrotowej),
- ekonomicznym.

Dobór sposobu regulacji zależy od wymagań układu napędowego.

1. Rodzaje regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego

Rozróżnia się regulację następujące rodzaje regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego:

1) Regulacja szeregową - polega na włączeniu rezystancji R , w szereg z obwodem twornika, umożliwiając regulację

w granicach od prędkości znamionowej do zera.

Ten sposób regulacji jest nieekonomiczny, ponieważ przy zmniejszeniu prędkości obrotowej do połowy w oporniku

regulacyjnym jest tracone dodatkowo 50% mocy pobieranej z sieci. Z tego względu ten sposób regulacji stosuje się

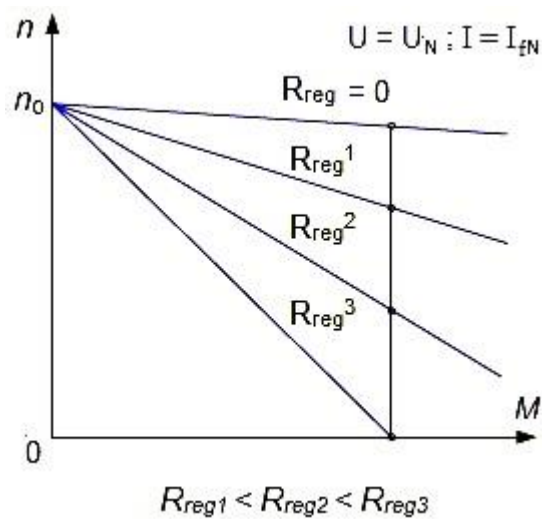
tylko w silnikach małej mocy.

2) Regulacja bocznikowa - polega na osłabieniu strumienia. Jak wynika z równania na prędkość obrotowa silnika

prądu stałego, włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wzbudzenia powoduje zmniejszenie strumienia i przy

określonym prądzie powoduje wzrost prędkości obrotowej. Ten sposób regulacji jest regulacją w górę od wartości n_N

do ok. $3n_N$. Straty powstałe w rezystancji R_{reg} są pomijalnie małe;



Rys. 9a. Charakterystyka regulacji prędkości obrotowej silnika bocznikowego przy włączaniu różnych dodatkowych rezystancji w obwód wzbudzenia

3) Regulację przez zmianę napięcia twornika - można uzyskać zmieniając napięcie zasilające twornik, przy znamionowym obciążeniu. Regulację prędkości przeprowadza się od zera do wartości większej od prędkości znamionowej. Prąd twornika nie ulega zmianie i zależy tylko od obciążenia.

2. Nastawianie prędkości obrotowej

Sposób regulacji prędkości obrotowej silnika prądu stałego dobiera się w zależności od wymagań układu napędowego.

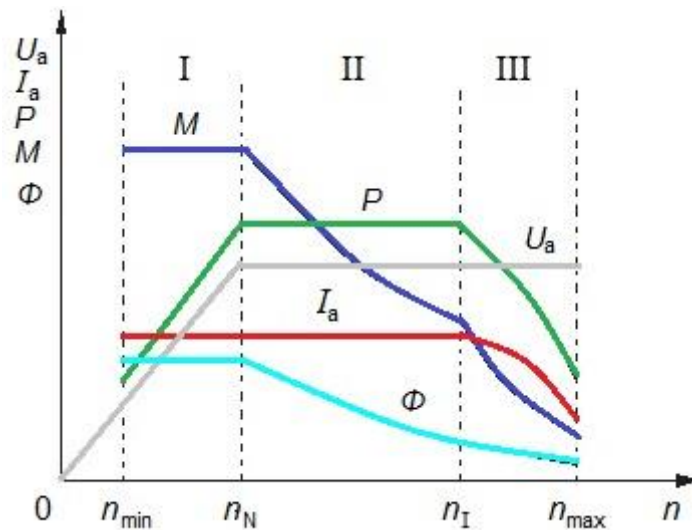
Z tego względu rozróżnia się trzy rodzaje nastawiania lub regulacji prędkości obrotowej:

- 1) gdy regulacja następuje od obrotów minimalnych n_{\min} do n_N , za pomocą napięcia lub rezystancji
 - w obwodzie twornika przy stałym elektromagnetycznym momencie obrotowym,
- 2) gdy regulacja następuje od obrotów znamionowych n_N do n_1 za pomocą zmniejszania strumienia magnetycznego przy stałej mocy znamionowej. Prędkość obrotowa $n_1 > n_N$,
- 3) gdy regulacja następuje od prędkości obrotowej n_1 do n_{\max} za pomocą zmniejszania strumienia Φ przy jednoczesnym zmniejszaniu prądu twornika. W celu osiągnięcia większej prędkości obrotowej od znamionowej przy napięciu U_N i rezystancji zewnętrznej w obwodzie twornika $R_r = 0$ należy strumień magnetyczny zmniejszyć według wzoru:

$$\Phi = \Phi_N \frac{n_N}{n}$$

Zmniejszenie strumienia magnetycznego uzyskuje się:

- w silniku obcowzbudnym - przez obniżenie napięcia wzbudzenia.
- w silniku bocznikowym oraz bocznikowo-szeregowym - za pomocą nastawnika oporowego włączonego szeregowo z uzwojeniem wzbudzającym bocznikowym.
- w silnikach szeregowych - za pomocą nastawnika oporowego włączonego równolegle z uzwojeniem wzbudzającym.



Rys. 10. Nastawianie prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Oznaczenia: M - moment obrotowy, P - moc, U_a - napięcie twornika, I_a - prąd twornika, Φ - strumień magnetyczny główny

3. Hamowanie elektryczne urządzenia napędzanego za pomocą maszyny prądu stałego występuje przy jej pracy

prądnicowej. Wytwarzana wówczas energia może być:

- zwracana do sieci (hamowanie odzyskowe) lub
- wytracana w zamkniętym obwodzie twornika po jego odłączeniu od sieci (hamowanie dynamiczne).

Hamowanie dynamiczne stosuje się zarówno w silnikach obcowzbudnych, bocznikowych jak i szeregowych.

Hamowanie elektryczne silnika może wystąpić również na skutek zmiany kierunku elektromagnetycznego momentu

obrotowego (np. przez zmianę zwrotu prądu w uzwojeniu twornika). Jest to tzw. hamowanie przy przeciwwłoczeniu.

Polega ono na nagłej zmianie biegunowości napięcia na zaciskach twornika i jednoczesnym włączeniu opornika w szereg z twornikiem. Ten rodzaj hamowania stosuje się do wszystkich rodzajów silników prądu stałego.