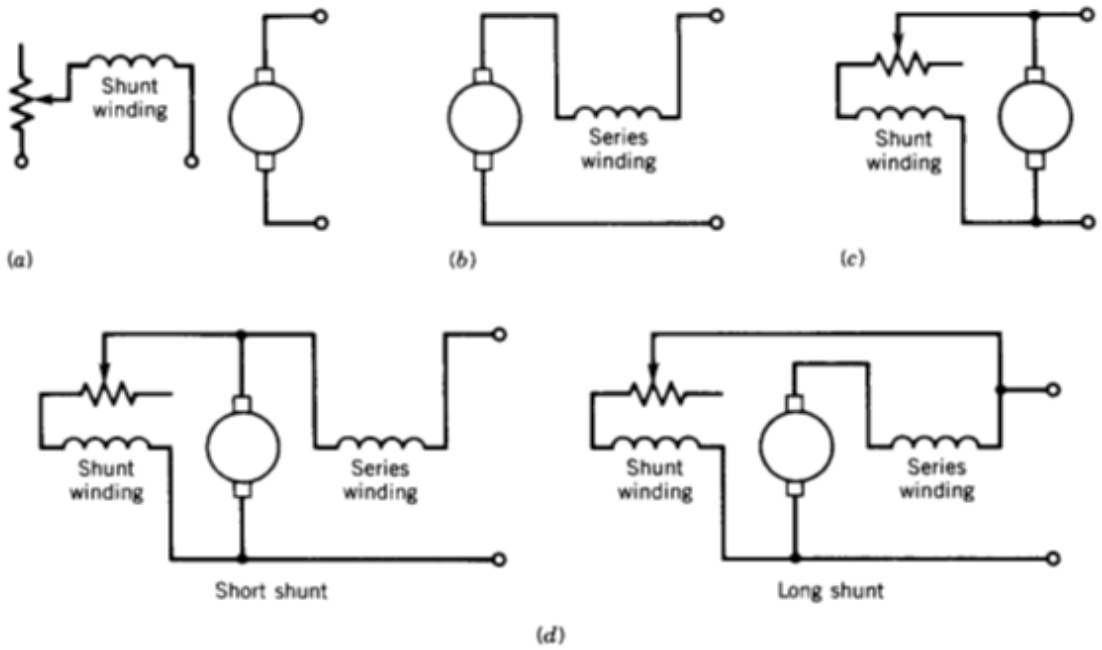
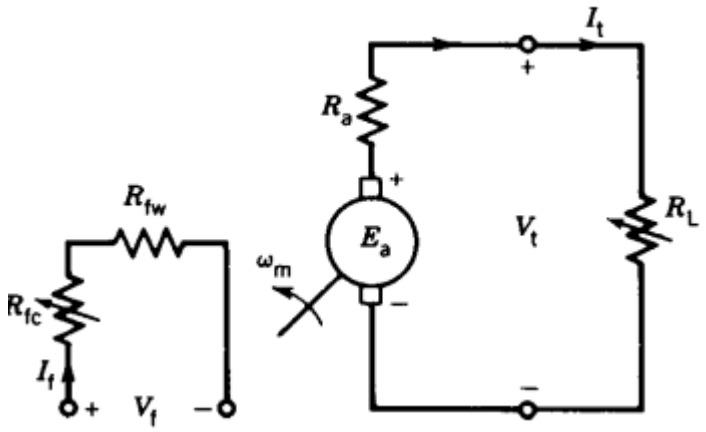
Maszyny prądu stałego - charakterystyki

Dwa podstawowe uzwojenia w maszynach prądu stałego, twornika i wzbudzenia, mogą być łączone ze sobą w różny sposób (*Rys. 1*). W zależności od ich wzajemnego połączenia możliwe jest kształtowanie charakterystyk uzyskując różne efekty działania.



Rys. 1 Różne sposoby połączeń uzwojenia wzbudzenia w obwodem twornika: (a) maszyna obcowzbudna (b) maszyna szeregowa. (c) maszyna bocznikowa. (d) połączenia mieszane (bocznikowo-szeregowe) [6].



Rys. 2 Schemat połączeń generatora obcowzbudnego [6].

Najczęściej obecnym stosowaną maszyną prądu stałego (*Rys. 2*) są maszyny obcowzbudne, gdzie obwód wzbudzenia jest zasilany z odrębnego źródła zasilania. Prędkość wirowania wirnika w generatorach jest wymuszona prędkością turbiny i w analizach przyjmujemy, że prędkość jest wartością stałą. Wartość napięcia na zaciskach twornika jest zależna od napięcia indukowanego (siły elektromotorycznej) oraz wartości rezystancji w obwodzie:

$$U_t = k\Phi\omega - R_t I_t \tag{1}$$

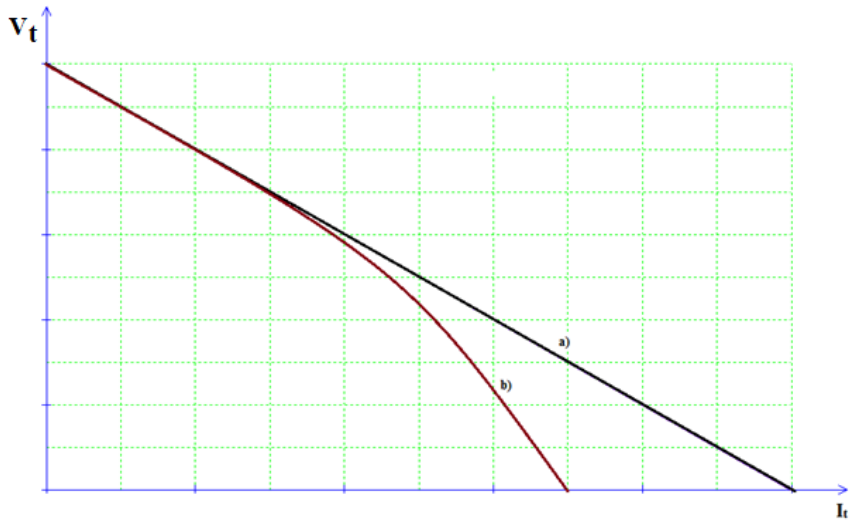
Przyjęcie założenia o stałej prędkości i stałej wartości strumienia powoduje że zależność pomiędzy napięcia na zaciskach jest liniowo zależna od prądu twornika (*Rys. 3*a). Uwzględnienie poprzecznej reakcji twornika spowoduje, że przy większych wartościach prądu następuje zmniejszenie strumienia, stąd rzeczywisty kształt charakterystyki zewnętrznej pokazano na *Rys. 3*b.

Wartość napięcia na zaciskach przy biegu jałowym generatora jest równa sile elektromotorycznej:

$$U_{t0} = k\Phi\omega \tag{2}$$

Prąd zwarcia jest wymuszony przez siłę elektromotoryczną i ograniczony jedynie rezystancją w obwodzie twornika:

$$I_{tz} = \frac{k\Phi\omega}{R_{tc}} \tag{3}$$



Rys. 3 Charakterystyka zewnętrzna generatora obcowzbudnego.

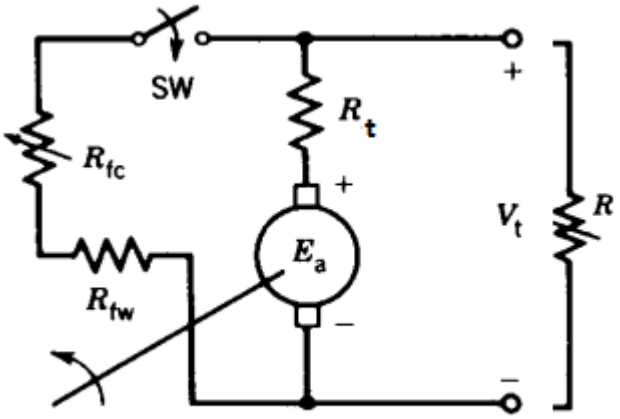
Wartość prądu przy obciążeniu rezystancją o wartości R można obliczyć wg. zależności:

$$I_t = \frac{k\Phi\omega}{R_{tc} + R} \tag{4}$$

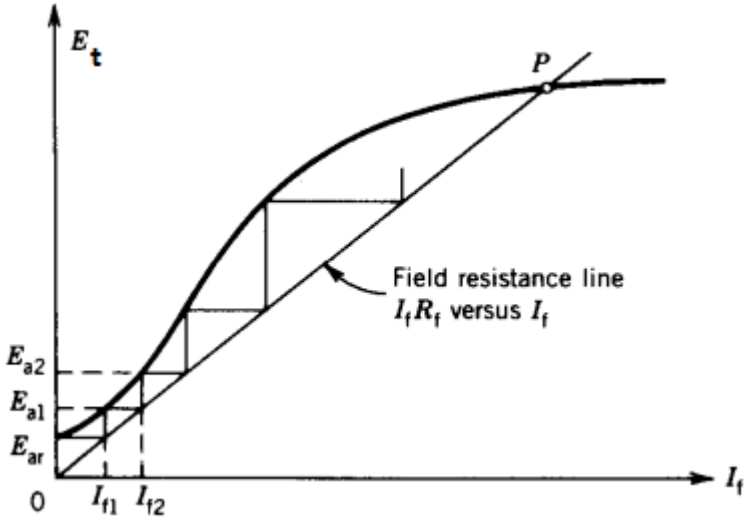
Generatory prądu stałego często stosuje się jako model obciążenia silnika. Zmiana prądu obciążenia powoduje bowiem zmianę momentu maszyny:

$$M_e = k\Phi I_t \tag{5}$$

Generator prądu stałego można zbudować łącząc bocznikowo uzwojenie wzbudzenia i twornika (*Rys. 4*).

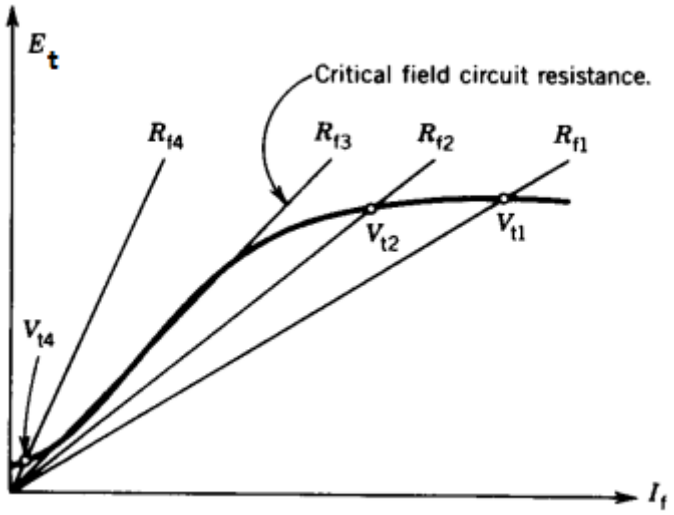


Rys. 4 Schemat połączeń generatora bocznikowego [6].



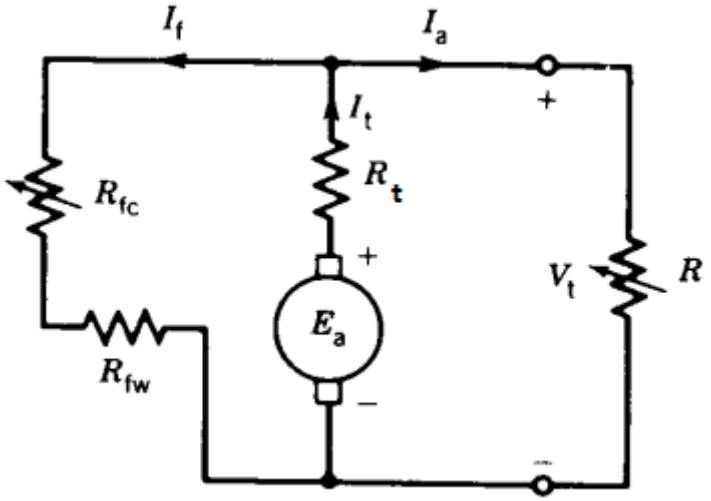
Rys. 5 Proces samowzbudzenia w generatorze bocznikowym [6].

Jeśli po rozpędzeniu wirnika do prędkości ω włączymy wyłącznik SW, to na skutek istnienia remanentu magnetycznego w uzwojeniu twornika zaindukuje się siła elektromotoryczna E_{ar} (*Rys. 5*). Taka wartość siły elektromotorycznej spowoduje w stanie ustalonym przepływ prądu ograniczonego sumaryczną rezystancję w obwodzie wzbudzenia i twornika i spowoduje przepływ prądu I_{f1} przez uzwojenie wzbudzenia. Prąd ten wytworzy strumień, który przy prawidłowym połączeniu uzwojeń, spowoduje wzrost strumienia magnetycznego a tym samym wzrost siły elektromotorycznej do wartości E_{a1}. Sytuacja taka powtórzy się aż do momentu, gdy wartość siły elektromotorycznej będzie równa spadkowi napięcia na sumarycznej rezystancji obwodu (punkt P na *Rys. 5*.



Rys. 6 Rezystancja krytyczna w generatorze bocznikowym [6].

Proces samowzbudzenia przebiega poprawnie, gdy wartość rezystancji w obwodzie będzie mniejsza od tzw. rezystancji krytycznej (*Rys. 6*). Warunkiem koniecznym jest także odpowiednie połączenie początków i końców uzwojenia wzbudzenia i twornika w taki sposób, by prąd płynący na skutek remanentu magnetycznego zwiększał wypadkową wartość strumienia. W sytuacji błędnego połączenia (lub nieprawidłowego kierunku obrotu wału wirnika) proces samowzbudzenie nie nastąpi – maszyna ma tendencje do rozmagnesowania. Taki sposób połączeń nazywa się połączeniem samobójczym. W przypadku, gdy w obwodzie występuje tylko rezystancja uzwojeń (brak dodatkowej rezystancji w obwodzie wzbudzenia), proces samowzbudzenia nastąpi jedynie przy odpowiednio dużej prędkości obrotowej. Jaj wartość minimalna nazywana jest prędkością krytyczną.

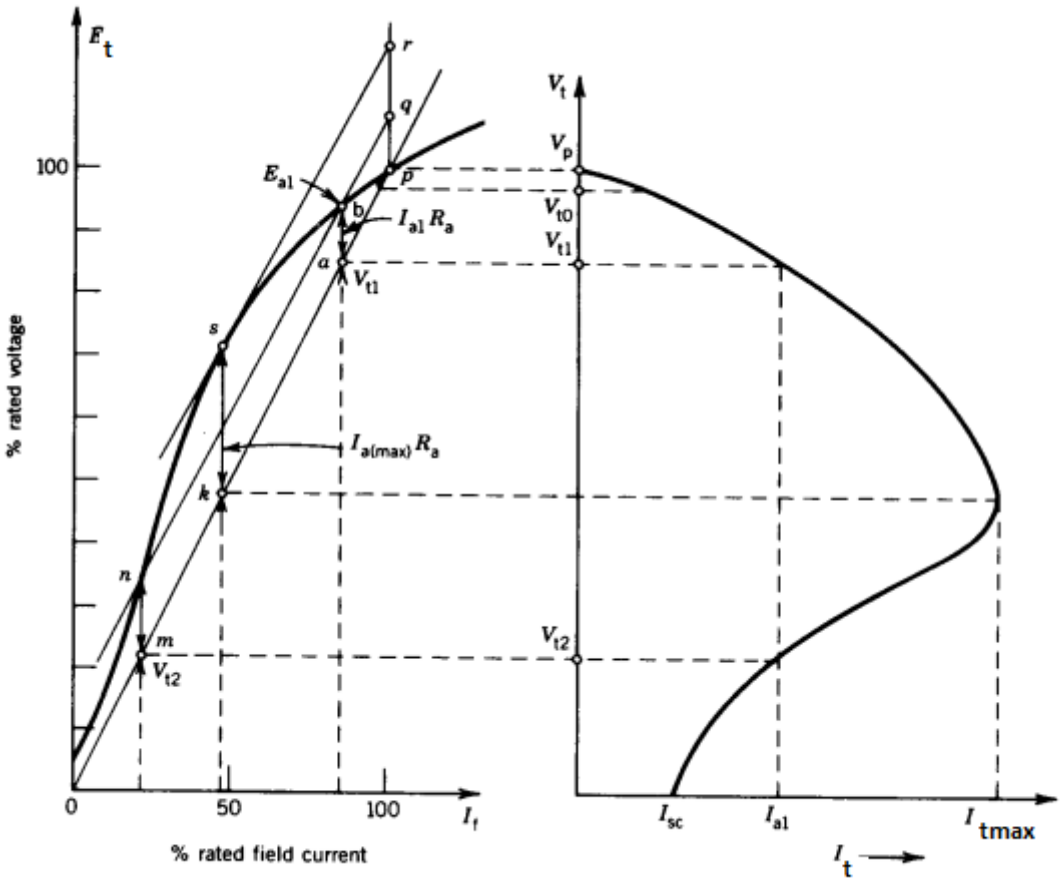


Rys. 7 Obciążenie generator bocznikowego [6].

.

Po wzbudzeniu się generatora można podłączyć do zacisków twornika rezystancję obciążenia. Wraz ze wzrostem prądu twornika zmieniać się także będzie napięcie na zaciskach uzwojenia wzbudzenia. Pojawi się spadek napięcia na rezystancji w obwodzie twornika, co spowoduje zmianę prądu wzbudzenia oraz zmniejszenie siły elektromotorycznej. Przy zerowej wartości prądu na zaciskach twornika będzie występować napięcie równe Vp (*Rys. 7*). W stanie ustalonym pionowy odcinek I_aR_a reprezentuje spadek napięcia na rezystancji twornika. Odcinek qbn jest równiolegóły do 0p, dlatego pq=ab=mn=$I_{a1}R_a$. Maksymalną wartość prądu obciążenia wystąpi w momencie gdy pojawi się maksymalne odchylenie przebiegu siły elektromotorycznej od linii prostej 0p. Zwarcie zacisków twornika spowoduje także zwarcie uzwojenia wzbudzenia. W takim przypadku o wartości siły elektromotorycznej decyduje strumień remanentu magnetycznego, a prąd zwarcia jest mniejszy od prądu znamionowego tej maszyny i jest równy:

$$I_{sc} = \frac{E_{ar}}{R_{tc}} = \frac{k\Phi_{ar}\omega}{R_{tc}} \tag{6}$$



Rys. 8 Charakterystyka zewnętrzna generatora bocznikowego [6].

W przypadku pracy silnikowej (*Rys. 9*) maszyny moment elektromagnetyczny M_e jest równy momentowi obciążenia M_0:

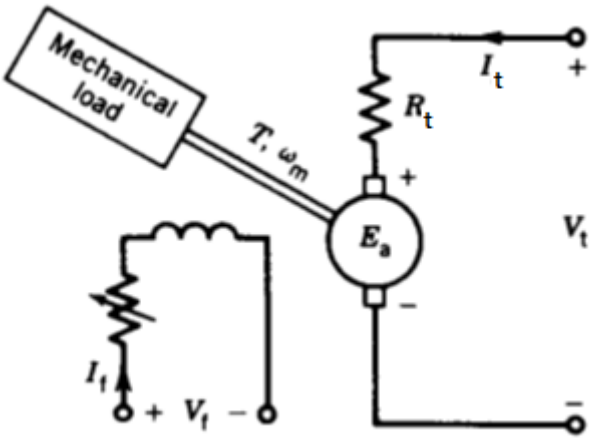
$$M_e = k\phi I_t = M_0 \tag{7}$$

Prąd twornika jest zatem wymuszony wartością momentu obciążenia i zależy także od strumienia w maszynie:

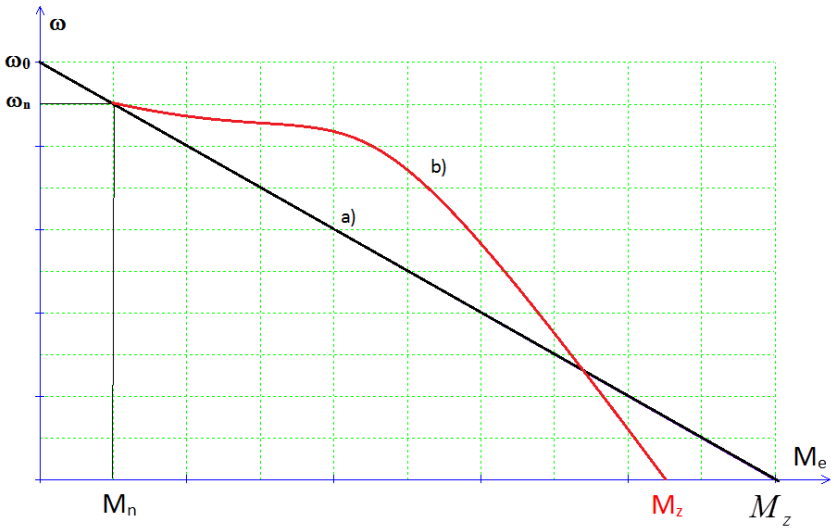
$$I_t = \frac{M_0}{k\phi} \tag{8}$$

Prędkość wirowania wału wirnika jest zatem związana z wartością napięcia zasilającego oraz spadku napięcia na rezystancji twornika:

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi} \tag{9}$$



Rys. 9 Schemat połączeń silnika obcowzbudnego [6].



Rys. 10 Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego: a) obwód magnetyczny liniowy, b) uwzględnienie poprzecznej reakcji twornika.

Zależność ta opisuje, przy stałej wartości strumienia, linię prostą pokazaną na *Rys. 10*a. Prędkość idealnego biegu jałowego (M_0=0), jest zależna od napięcia zasilającego oraz strumienia magnetycznego:

$$\omega_0 = \frac{U_t}{k\phi} \tag{10}$$

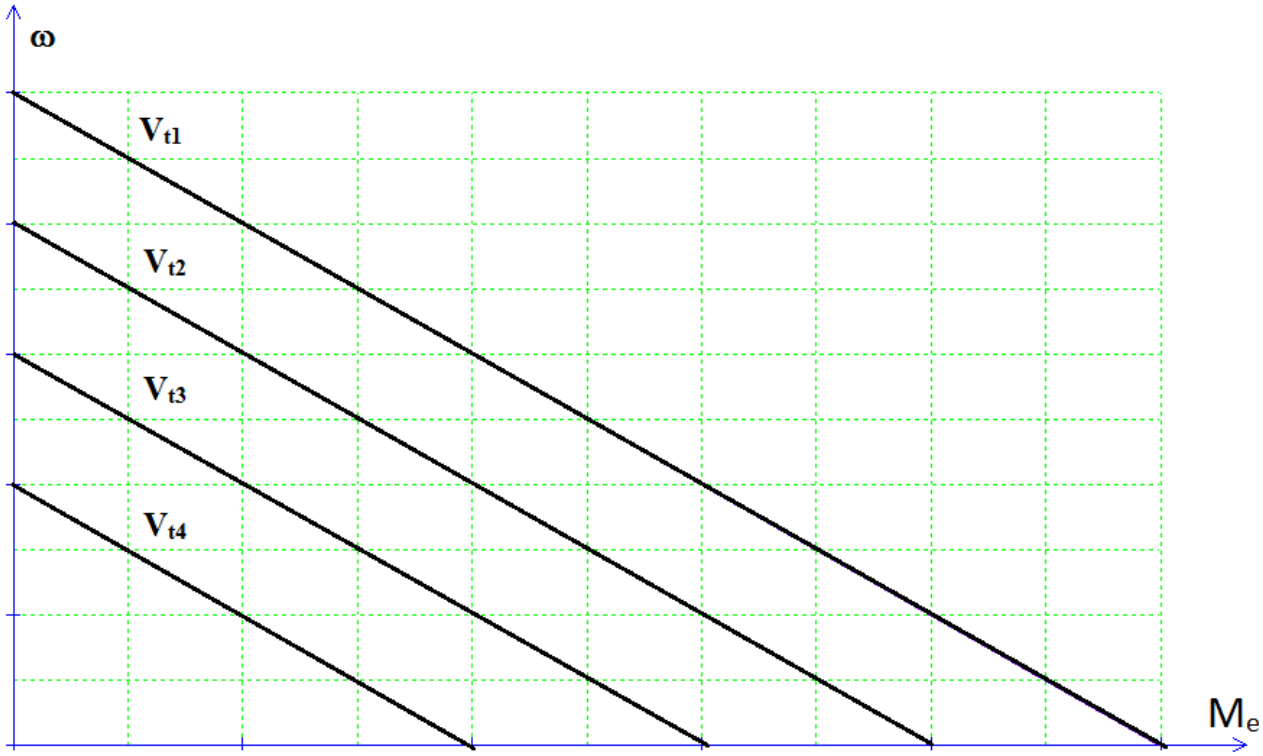
Prąd zwarcia występuje przy prędkości równej zero:

$$I_z = \frac{U_t}{R_t} \tag{11}$$

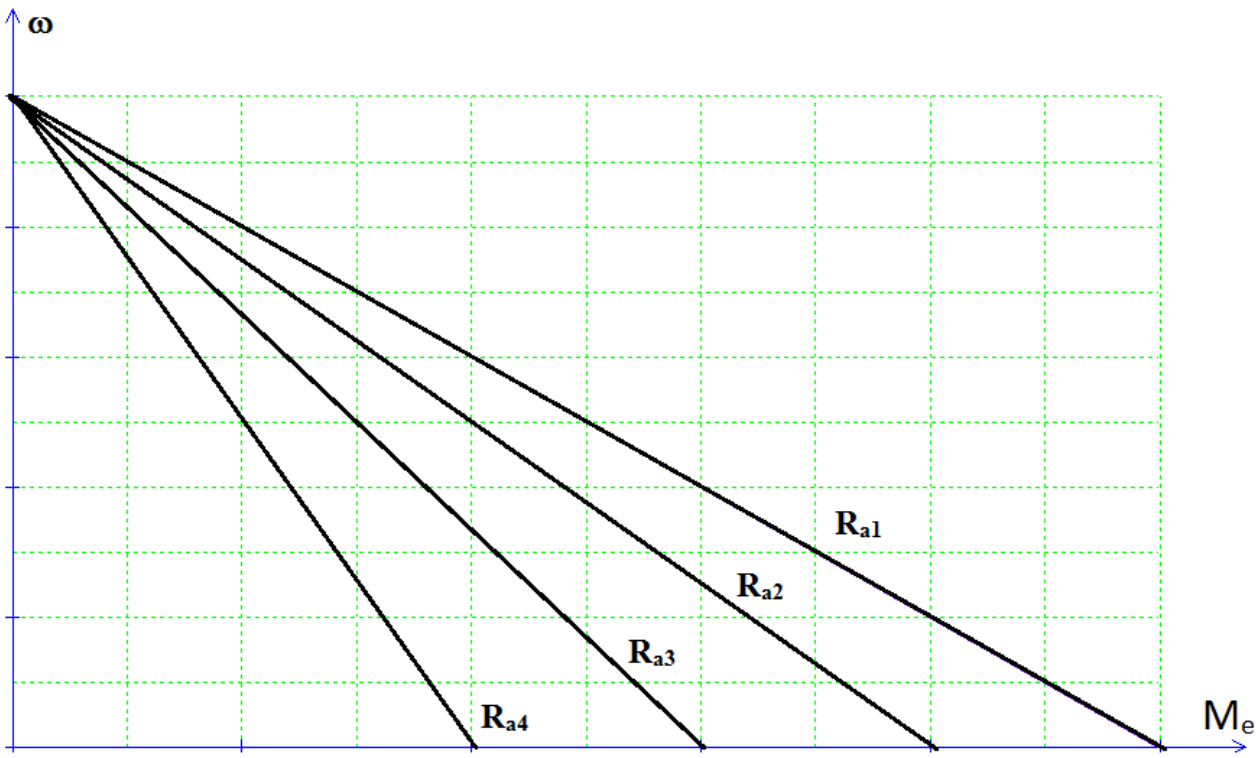
Moment zwarcia jest proporcjonalny do strumienia magnetycznego:

$$M_z = k\phi I_z \tag{12}$$

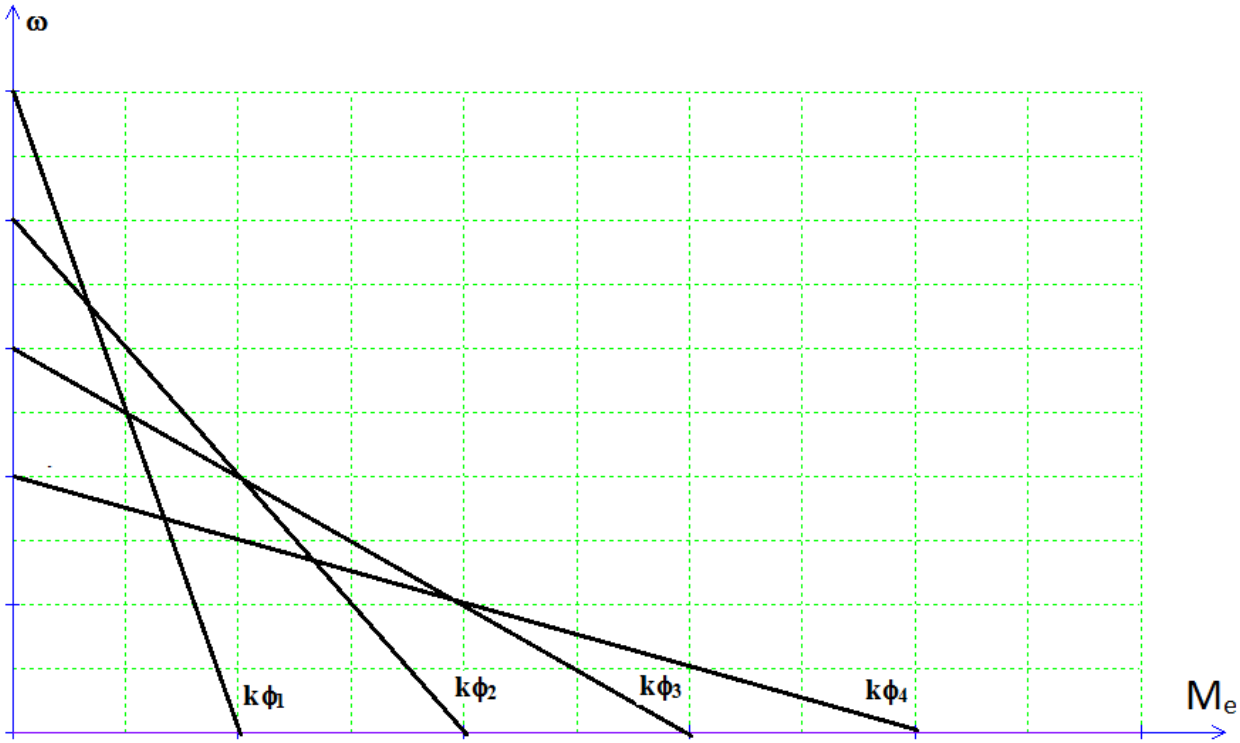
W przypadku uwzględnienia zmniejszenia się strumienia na skutek poprzecznej reakcji twornika moment zwarcia jest mniejszy niż w przypadku pominięcia nasycenia obwodu magnetycznego (*Rys. 10*b). Kształt charakterystyk mechanicznych maszyny obcowzbudnej prądu stałego jest zależny od napięćia zasilającego (*Rys. 11*), sumarycznej rezystancji w obwodzie twornika (*Rys. 12*), oraz różnych wartości strumienia wytwarzanego przez prąd wzbudzenia (*Rys. 13*).



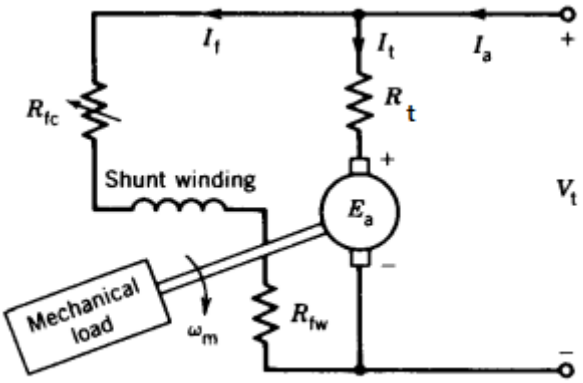
Rys. 11 Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości napięcia twornika.



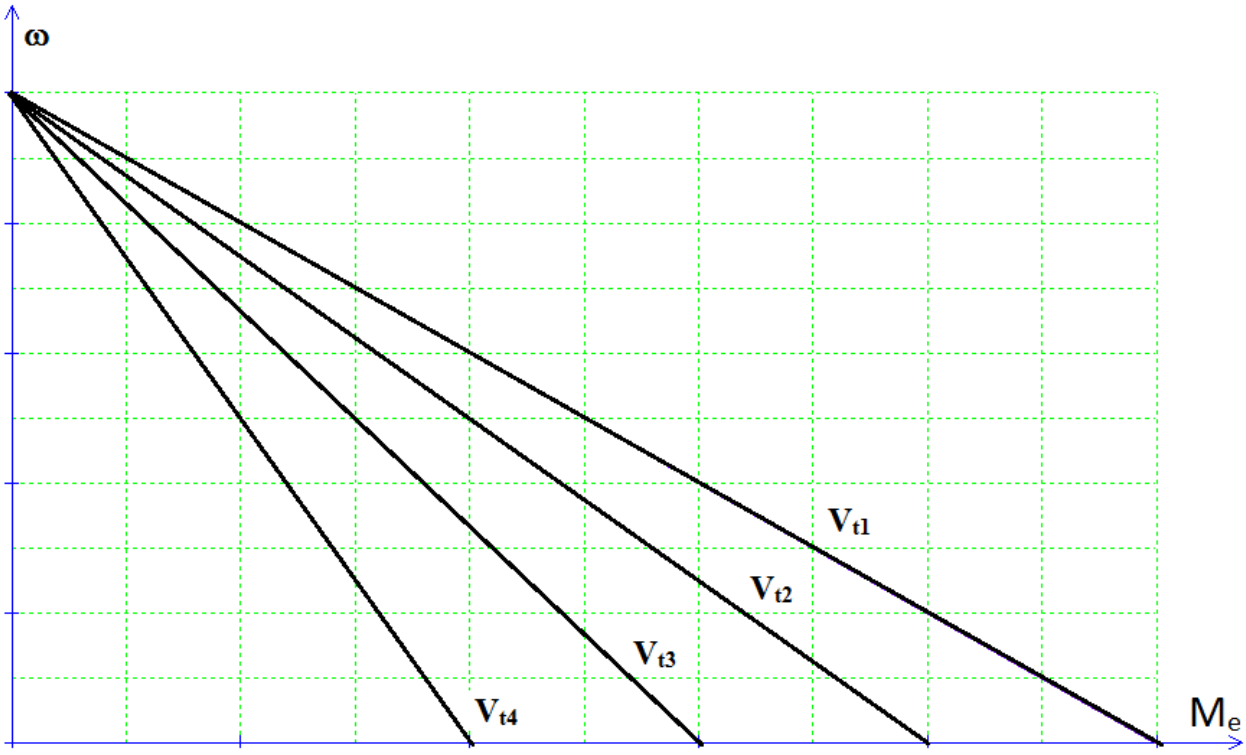
Rys. 12 Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika.



Rys. 13 Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych prądu wzbudzenia.



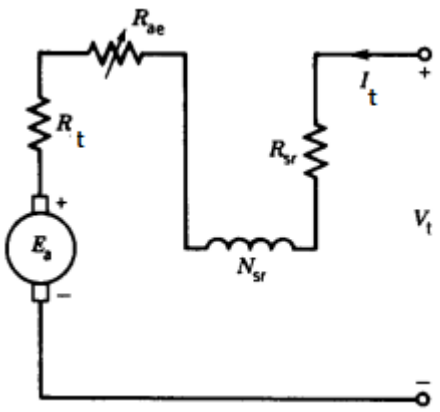
Rys. 14 Schemat połączeń silnika bocznikowego [6].



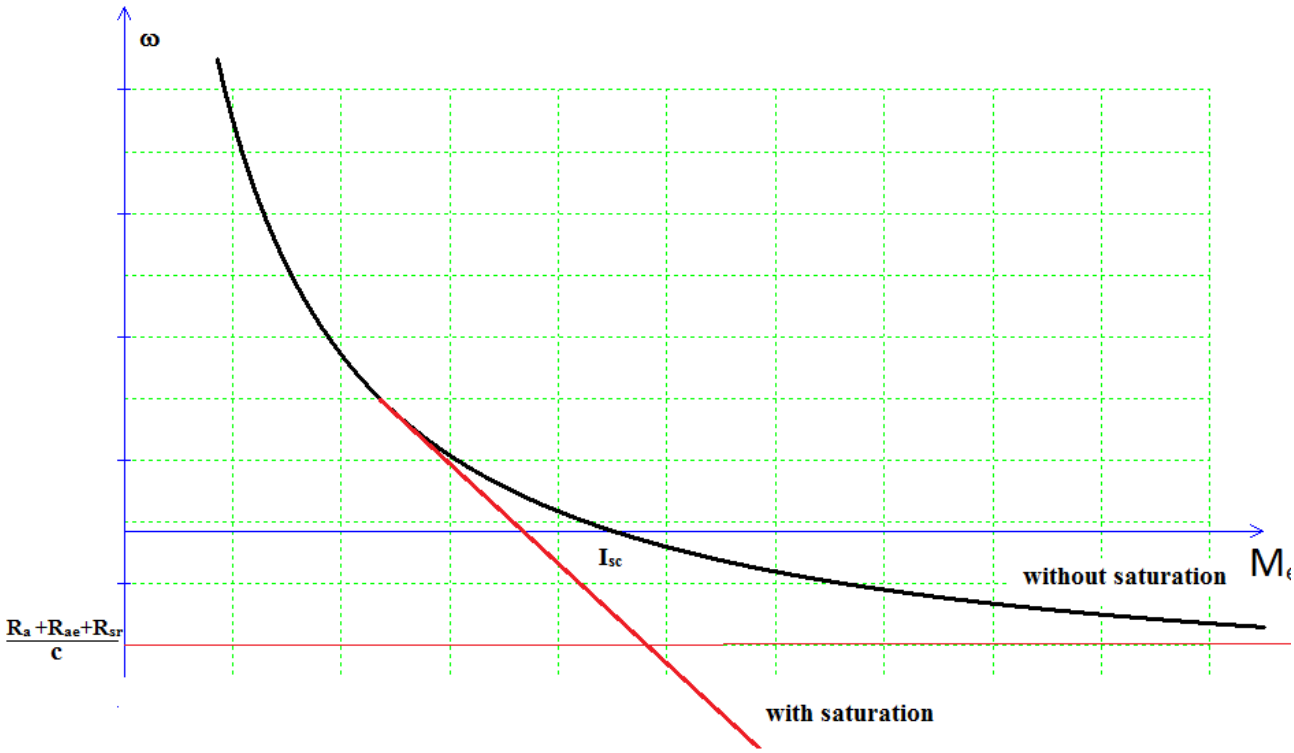
Rys. 15 Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego dla różnych wartości napięcia twornika.

Silnik bocznikowy prądu stałego (

Rys. 14) zachowuje się podobnie do maszyny obcowzbudnej jedynie przy stałej wartości napięcia twornika. Napięcia na zaciskach twornika jest jednocześnie napięciem wzbudzenia, stąd jego zmiana powoduje proporcjonalną (przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego) zmianę strumienia, stąd maszyna ta inaczej reaguje na zmianę napięcia zasilającego. Należy także podkreślić, że dla silnika bocznikowego obciążonego momentem znamionowym niedopuszczalne jest zmniejszanie napięcia zasilającego. Taka zmiana powoduje bowiem zmniejszenie strumienia i zwiększenie prądu twornika powyżej jej wartości znamionowej.



Rys. 16 Schemat połączeń silnika szeregowego [6].



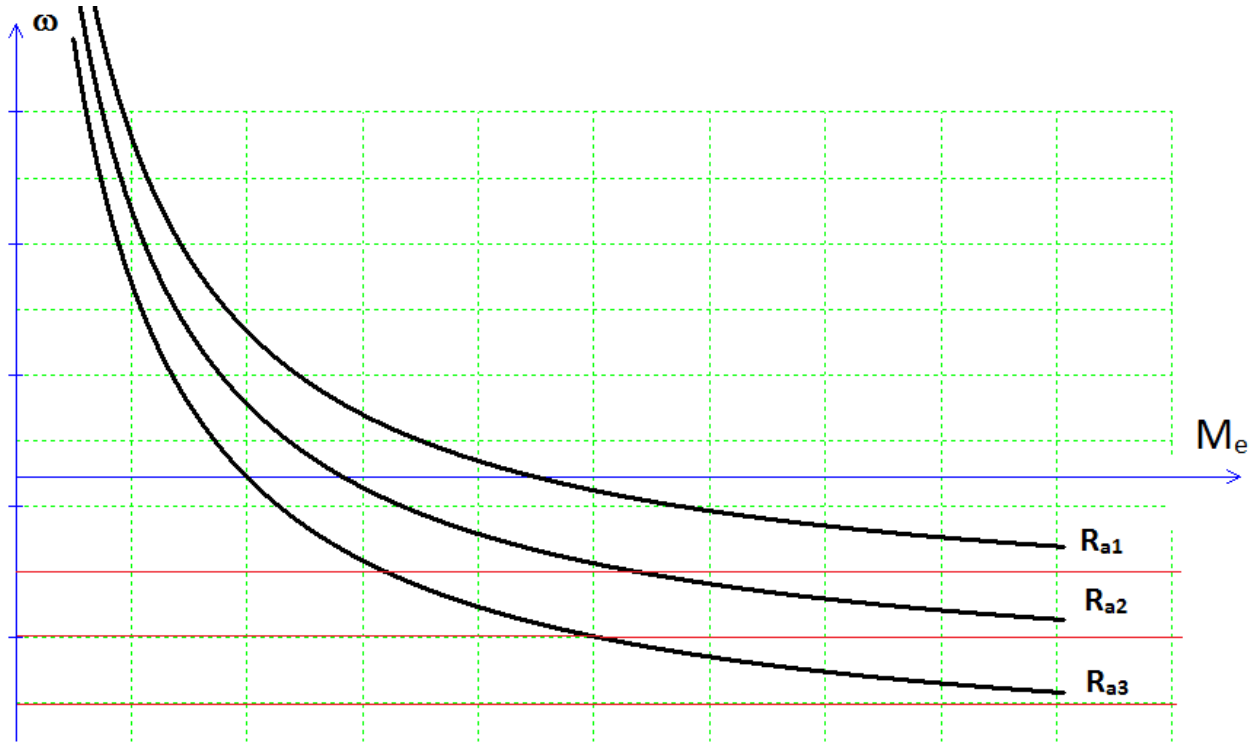
Rys. 17 Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego dla liniowego obwodu magnetycznego oraz uwzględniającego nasycenie.

W silniku szeregowym prądu stałego (*Rys. 16*) wartość prądu wzbudzenia jest jednocześnie prądem twornika. Przy pominięciu nasycenia obwodu magnetycznego wartość strumienia jest zatem proporcjonalna do prądu twornika:

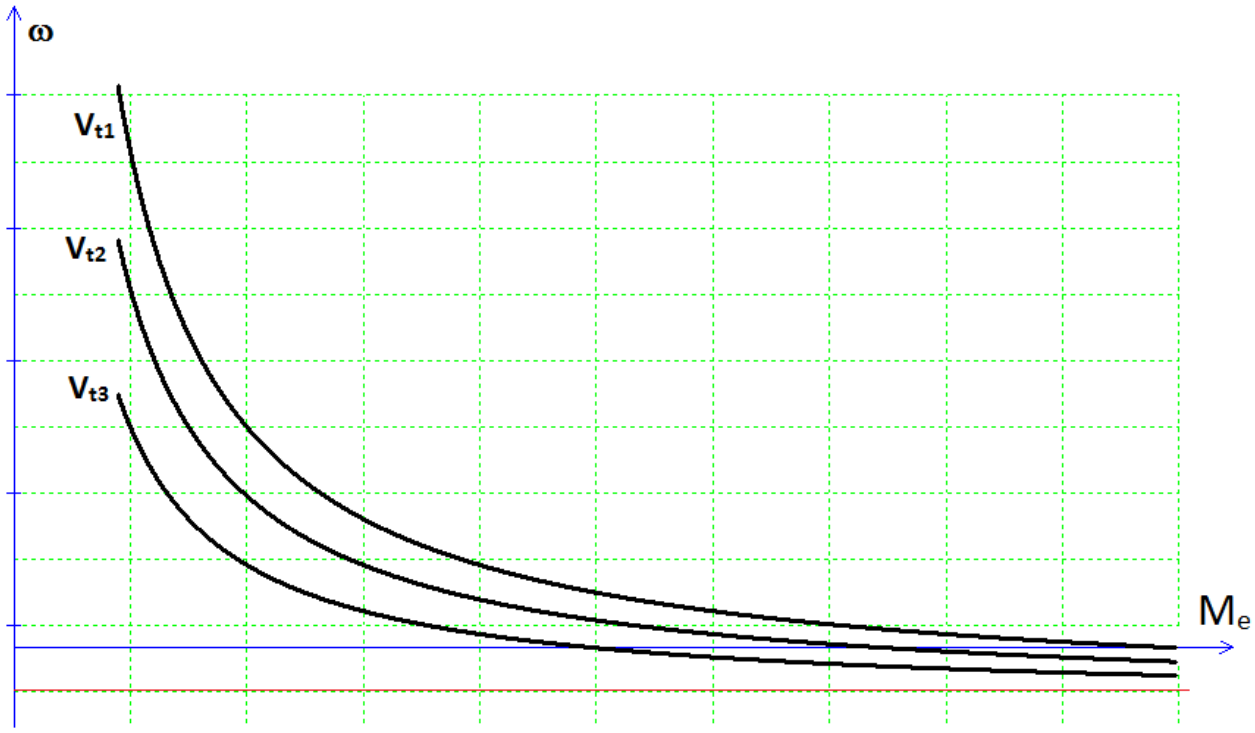
$$k\phi = cI_t \tag{13}$$

Moment elektromagnetyczny jest równy:

$$M_e = cI_t^2 \tag{14}$$



Rys. 18 Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego).



Rys. 19 Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego różnych wartości napięcia twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego).

Prędkość wirowania wirnika wyraża się zależnością:

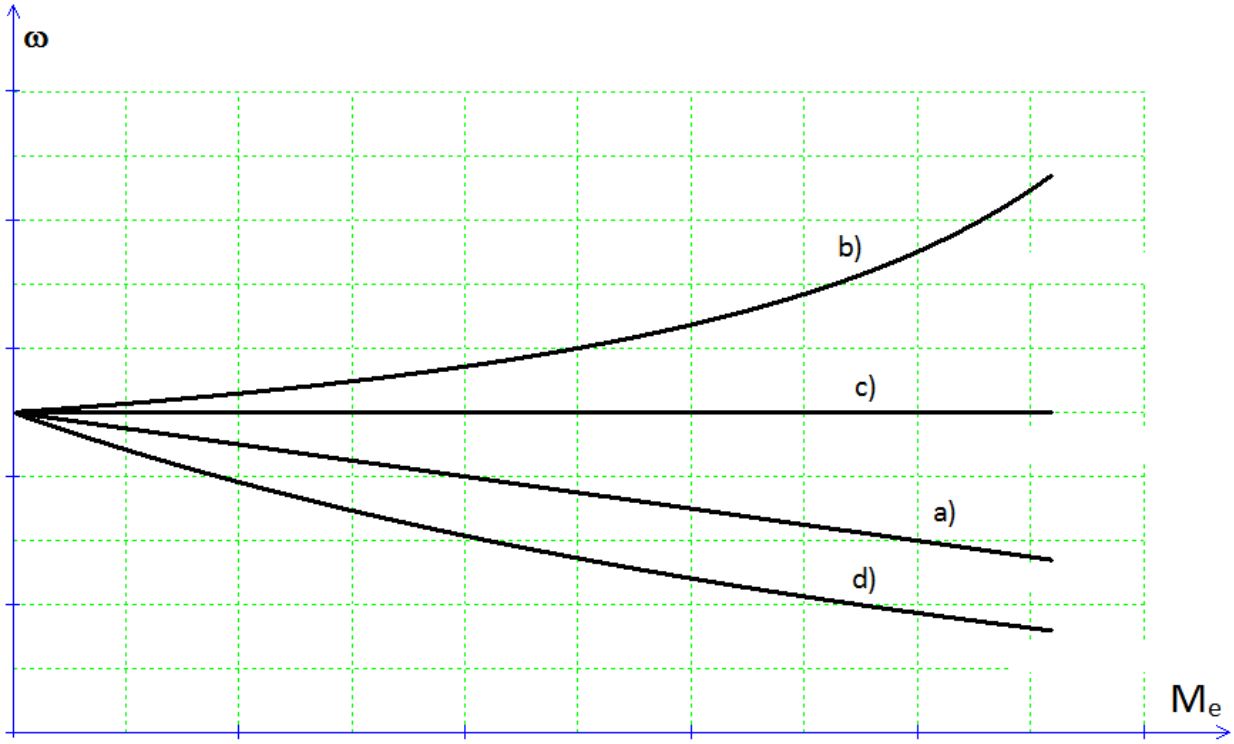
$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{cI_t} = \frac{U_t}{cI_t} - \frac{R_t}{c} \tag{15}$$

Kształt charakterystyk mechanicznych dla różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika pokazano na *Rys. 18* dla różnych napięć zasilających na *Rys. 19*.

Prąd twornika jest wymuszony przez moment obciążenia, stąd w maszynie szeregowej występuje zmiana wzbudzenia w szerokim zakresie pracy i niewątpliwie przy większych wartościach prądu obwód magnetyczny będzie silnie nasycony, stąd uwzględnienie nasycenia powoduje, że od pewnej wartości prądu twornika strumień praktycznie się nie zwiększy i wówczas prędkość wirnika można wyrazić zależnością:

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi_{nas}} \tag{16}$$

Charakterystyka mechaniczna przy silnym nasyceniu przechodzi zatem w linię prostą (*Rys. 17*).



Rys. 20 Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego z dozwojeniem szeregowym.

W praktyce używa się często dwóch źródeł pola magnetycznego. Oprócz bocznikowego (obcowzbudnego) uzwojenia stosuje się jednocześnie dozwojenie szeregowe. Prędkość obrotowa zależy wówczas zarówno od prądu wzbudzenia jak i od prądu twornika, a prędkość obrotową można wówczas obliczać wg. zależności:

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi \pm c I_t} \tag{17}$$

Kształt charakterystyk uzależniony jest od sposobu podłączenia dozwojenia szeregowego. Może ono wytwarzać pole magnetyczne w kierunku przeciwnym do pola wytwarzanego przez uzwojenie bocznikowe (obcowzbudne). Rozwiązanie takie stosuje się często w celu „usztywnienia" charakterystyki mechanicznej silnika bocznikowego (*Rys. 20*a). Teoretycznie można tak dobrać część pola wytwarzaną przez dozwojenie szeregowe by ze wzrostem prądu prędkość nie zmieniała się (*Rys. 20*b) (pełnia kompensacja spadku napięcia na rezystancji twornika). Możliwy jest nawet stan, gdy ze wzrostem obciążenia rośnie prędkość (*Rys. 20*c) W praktyce, przy prądzie twornika większym od ok 80% prądu znamionowego, reakcja poprzeczna twornika powoduje zmniejszenie strumienia i niemożliwe jest uzyskanie linii prostej jako charakterystyki mechanicznej w maszynach prądu stałego. Możliwe jest także kształtowanie charakterystyki mechanicznej poprzez stosowanie połączenia wzmacniającego pole wraz ze wzrostem prądu twornika (*Rys. 20*d) powodując, że ze wzrostem obciążenia prędkość maleje szybciej niż wynika ze spadku napięcia na rezystancji twornika.

Efekty podobne do opisanych wyżej uzyskuje się także w sytuacji, gdy wysuwamy szczotki ze strefy neutralnej (wpływ podłużnej reakcji twornika).

Literatura:

[1] Rene Le Doeuff, Mohamed El Hodi Zaim: Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2010

[2] Wildi Theodore: Electrical Machines, Drives and Power Systems. Pearson Education, New Jersey 2006

[3] Chapman Stephen J.: Electrical Machinery Fundamentals. McGraw Hill, New York 2005

[4] Fitzgerald A. E., Kingsley Ch., Unmans S. D.: Electric Machinery. McGraw Hill Higher Education 2003

[5] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff: Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. John Wiley & Sons Inc. IEEE Press Piscataway, New York 2002

[6] Sen P. C.: Principles of electric machines and power electronics. Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, John Wiley & Sons, 1998.

[7] Syed Nasar: Electric machines and electromechanics, Schaum's outline series, McGraw Hill, New York, 1998.

[8] Przyborowski W., Kamiński G.: Maszyny elektryczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.

[9] Mitew E., Maszyny Elektryczne, T1, T2, Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2005

[10] Matulewicz W., Maszyny elektryczne w elektroenergetyce, PWN, Warszawa 2005

[11] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1982