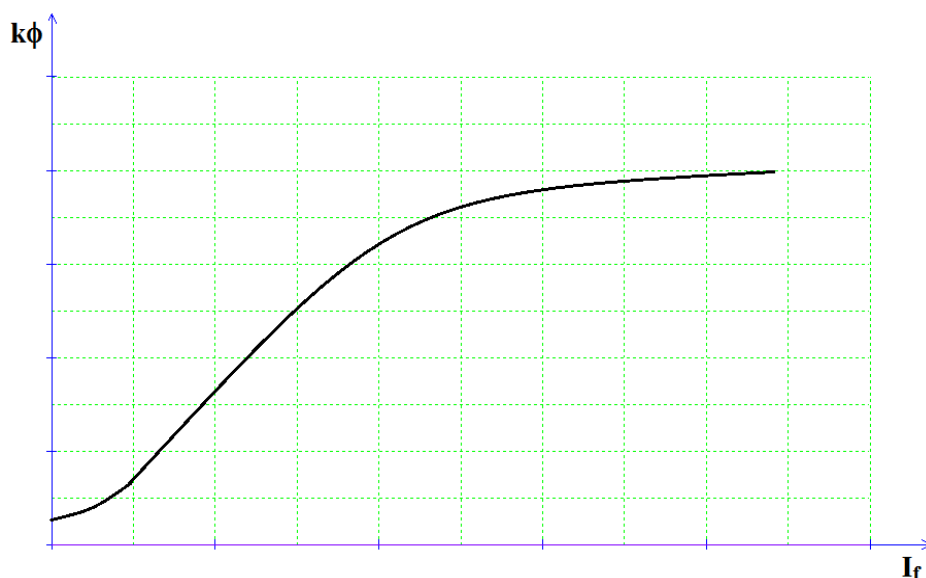


Maszyny prądu stałego – reakcja twornika

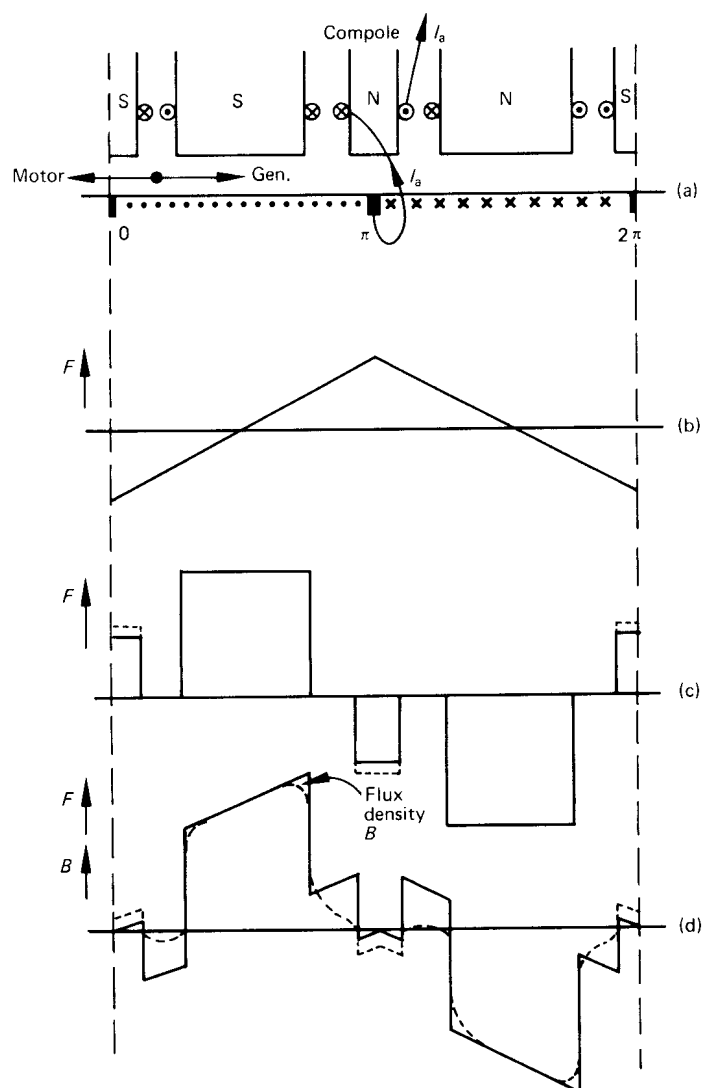
W maszynach prądu stałego niezbędne jest uwzględnienie zjawisk wynikających z krzywej magnesowania oraz z rzeczywistego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem. Na Rys. 1 pokazano praktyczną zależność strumienia magnetycznego od wartości prądu wzbudzenia w maszynie prądu stałego. W praktyce zawsze występuje strumień remanentu magnetycznego oraz nieliniowa zależność pomiędzy tymi wielkościami.



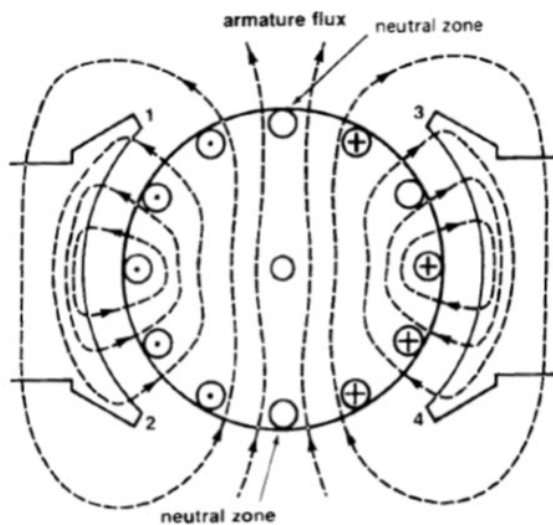
Rys. 1 Zależność strumienia od prądu wzbudzenia

Pole magnetyczne wytwarzane jest zawsze przez prądy płynące w obwodach. Prąd wzbudzenia wytwarza strumień magnetyczny pokazany na Rys. 1. W przypadku obciążenia maszyny prąd twornika także wytwarza pole magnetyczne. Na Rys. 2 pokazano uproszczony rozkład pola magnetycznego wytwarzanego przez bieguny główne oraz bieguny pomocnicze (Rys. 2c). Rys. 2b jest wynikiem założenia o dużej liczbie żłobków wirnika i prezentuje kształt natężenia pola magnetycznego wytwarzany przez prąd płynący w wirniku. Wypadkowy kształt wymuszenia H (linia ciągła Rys. 2d) oraz przybliżony rozkład wartości indukcji (linia przerywana Rys. 2d) w szczelinie powietrznej jest wynikiem prądu wzbudzenia oraz prądu twornika przy szczotkach umieszczonych w strefie geometrycznie neutralnej. Wartość strumienia magnetycznego jest proporcjonalna do powierzchni pod krzywą indukcji. W przypadku pominięcia nasycenia obwodu magnetycznego, z uwagi na symetrię pola wytworzonego przez wirnik, strumień wypadkowy pod biegunami jest wartością stałą. Zmienia się rozkład pola zmniejszając jego wartość pod jedną częścią bieguna i zwiększając pod drugą. Efektem jest zmniejszenie wartości sił elektromotorycznych w uzwojeniach położonych pod obniżoną wartością indukcji, natomiast efekt wypadkowej wartości napięcia indukowanego nie zmienia się. Problem pojawia się w sytuacji, gdy uwzględnimy nasycenie obwodu magnetycznego. W części bieguna o zwiększonej wartości

wymuszenia może dojść do nasycenia obwodu magnetycznego i w efekcie następuje zmniejszenie wartości strumienia.

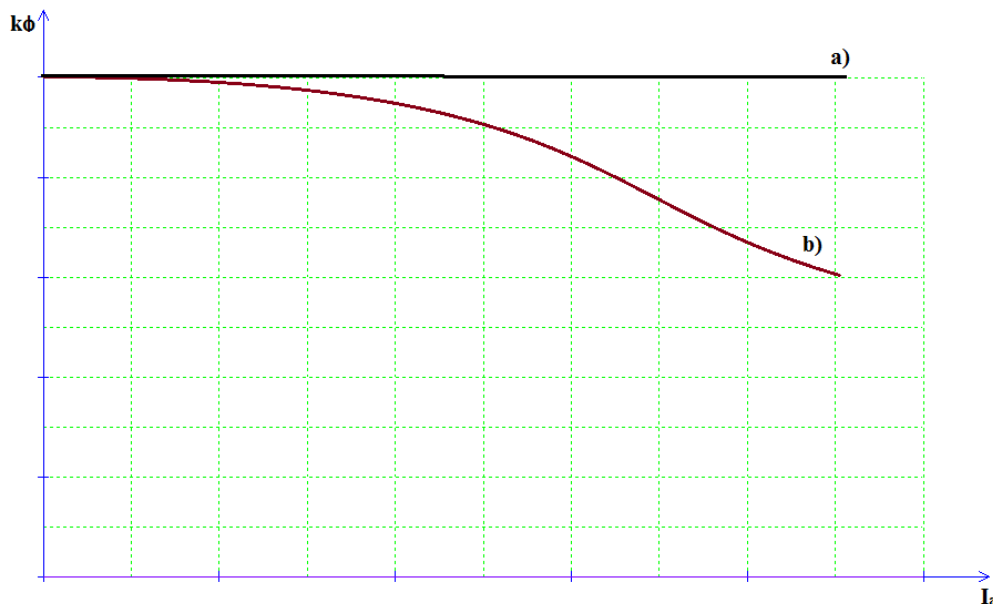


Rys. 2 Rozkład pola magnetycznego w maszynie prądu stałego – efekt reakcji twornika [2].



Rys. 3 Rozkład pola magnetycznego od prądu twornika (reakcja twornika) [2].

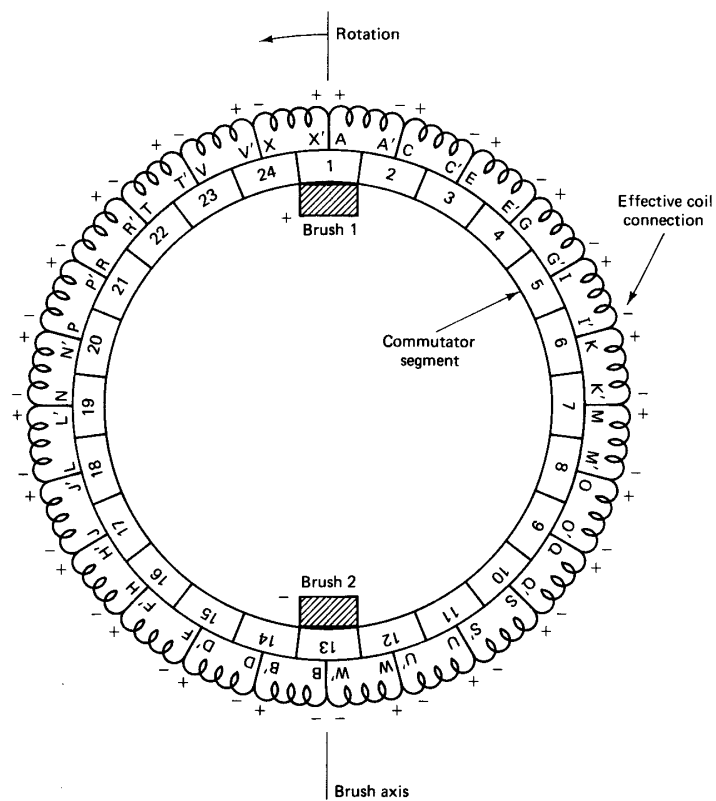
Pole magnetyczne wytworzone przez obwód wzbudzenia jest skierowane pomiędzy biegunami i wyznacza położenie osi podłużnej (osi d). Prąd twornika, przy szczotkach umieszczonych w strefie geometrycznie neutralnej, wytwarza pole skierowane pod kątem prostym do osi d, nazywamy ją osią poprzeczną q i umownie reakcję twornika przy szczotkach umieszczonych w strefie neutralnej nazywamy poprzeczną reakcją twornika. Wpływ poprzecznej reakcji twornika na wartość strumienia magnetycznego pokazano na Rys. 4.



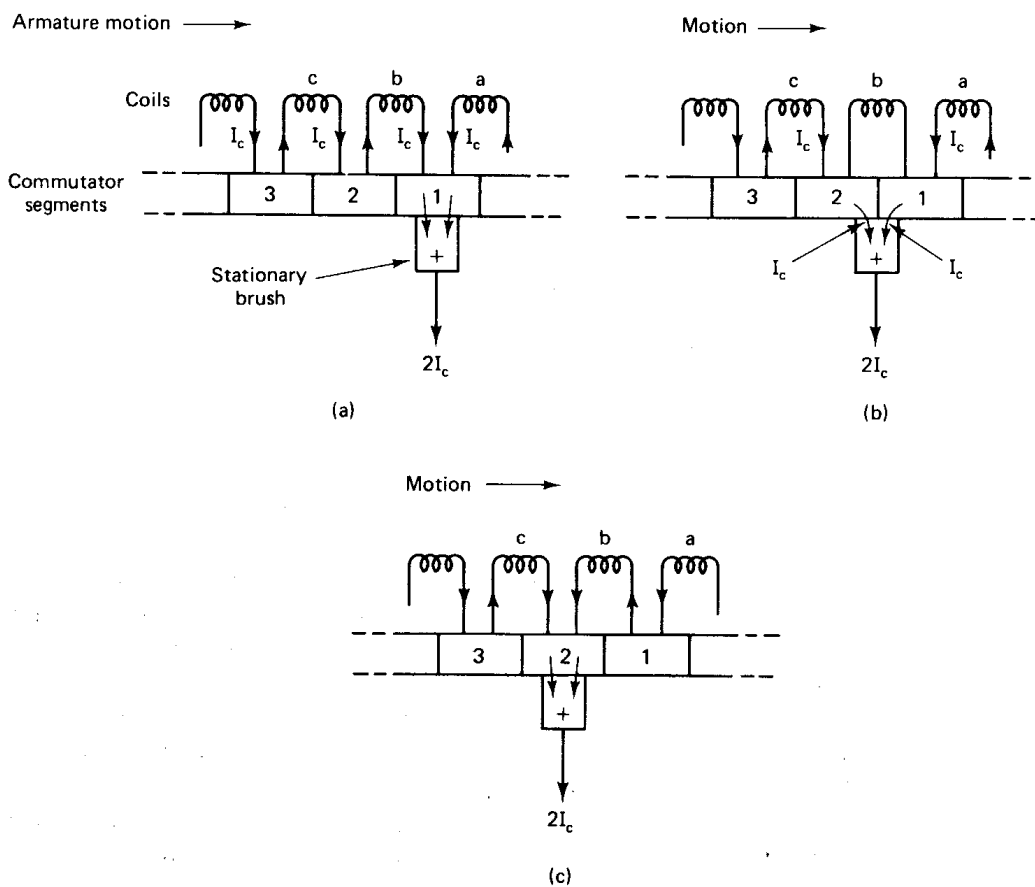
Rys. 4 Zależność strumienia magnetycznego w maszynie prądu stałego od prądu twornika: a) pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego, b) wpływ nasycenia fragmentów rdzenia.

Widoczny efekt zmniejszenia strumienia występuje tu dopiero od pewnej wartości prądu twornika. Zwykle zauważalny wpływ reakcji twornika występuje od ok 80% wartości prądu znamionowego i oczywiście jest zależny od wartości prądu wzbudzenia. Innym efektem reakcji twornika jest fakt pojawienia się pola magnetycznego w osi poprzecznej. Ma to istotne znaczenie dla procesu zmiany kierunku prądu w zezwoju komutującym, stąd na Rys. 2c i Rys. 2d pokazano konieczność zastosowania biegunów komutacyjnych. Uzwojenie biegunów komutacyjnych musi być szeregowo połączone z uzwojeniem twornika i musi zmniejszać wartość pola magnetycznego reakcji twornika w osi geometrycznie neutralnej.

Największe problemy w maszynach prądu stałego związane są z procesem zmiany kierunku prądu w zezwojach które przechodzą pomiędzy biegunami. Nazywamy to procesem komutacji. Rys. 5 przedstawia schematycznie sposób połączenia uzwojenia twornika oraz jego połączenie z wycinkami komutatora i do nieruchomych szczotek.

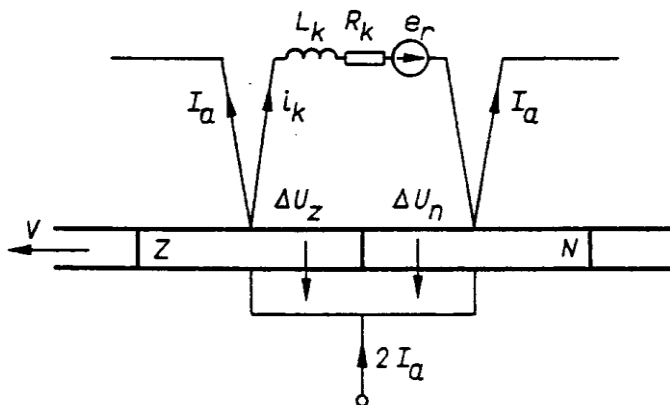


Rys. 5 Uzwojenie twornika i jego połączenie do komutatora [6].

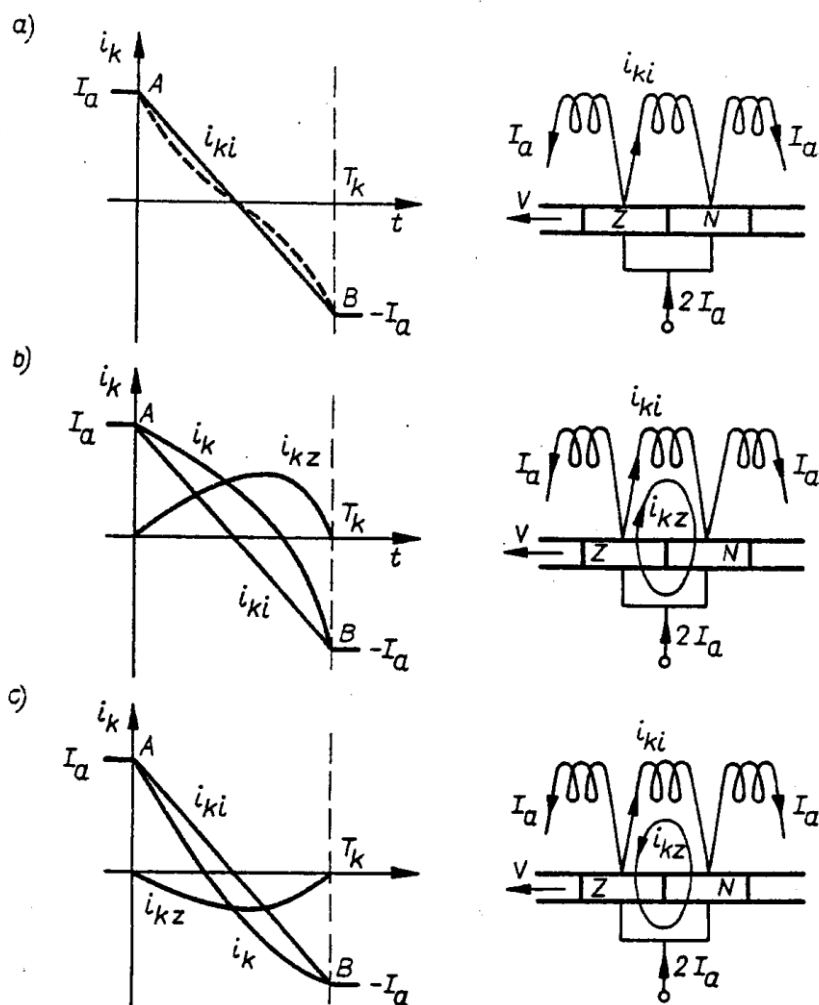


Rys. 6 Proces komutacji [6].

Obrót komutatora powoduje, że prąd płynący przez szczotki do 1 wycinka komutatora rozdziela się na dwie gałęzie równoległe Rys. 6a. Ruch komutatora powoduje zwarcie ze sobą sąsiednich wycinków (Rys. 6b) wraz z zezwojem komutującym przez szczotkę. Po pewnym czasie całość prądu doprowadzonego do twornika jest przejmowana przez następny wycinek komutatora (Rys. 6b), co kończy proces komutacji w zezwoju dołączonym do 1 i 2 wycinka komutatora.



Rys. 7 Schemat zastępczy zezwoju komutującego [9].

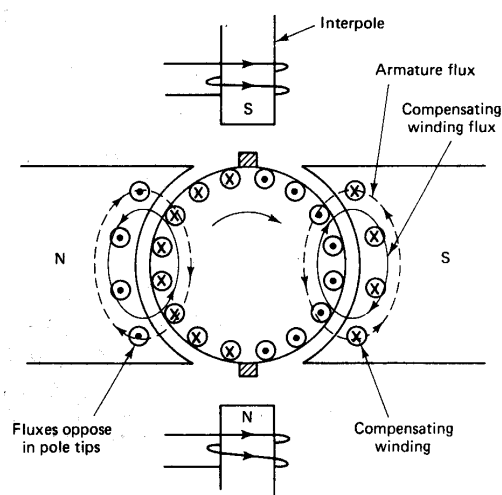


Rys. 8 Komutacja prostoliniowa a), opóźniona b) i przyspieszona c) [9].

W zezwoju komutującym prąd płynący przed zwarciem był równy I_a (Rys. 7), po zakończeniu procesu komutacji jest równy $-I_a$. W czasie procesu komutacji obwód zwarty można przedstawić w postaci schematu zastępczego (Rys. 7), w którym występuje spadek napięcia na rezystancji zezwoju R_k , napięcie samoindukcji związana z indukcyjnością zezwoju L_k , napięcie rotacji będące efektem indukcji różnej od zera przy przejściu przez strefę neutralną (efekt reakcji twornika i istnienia biegunów komutacyjnych) oraz napięcie przejścia pomiędzy szczotką i wycinkami komutatora.

Idealny proces komutacji to zapewnienie wyzerowania wartości chwilowych sumy napięcia samoindukcji o rotacji, mówimy wówczas o komutacji prostoliniowej (Rys. 8a). Zaletą takiego sposobu zmiany kierunku prądu w zezwoju jest stałość gęstości prądu na całej szerokości szczotki. W praktyce nie osiągalny, możliwe jest uzyskanie zerowej wartości średniej tych napięć w czasie komutacji. Jeśli jest zbyt mała wartość napięcia rotacji to proces komutacji jest opóźniony (Rys. 8b). Opóźniony proces komutacji powoduje, że pod koniec procesu wzrasta gęstość prądu na części szczotki co może prowadzić do iskrzenia na styku szczotki i wycinka komutatora. Jeśli wartość napięcia rotacji będzie zbyt duża to gęstość prądu wzrasta po drugiej stronie szczotki i także może prowadzić do iskrzenia. Jakość procesu komutacji jest zatem uzależniona od wartości prądu twornika, prędkości obrotowej wału wirnika oraz innych czynników takich jak stan szczotek i komutatora czy też zanieczyszczeń na komutatorze i siły docisku szczotek do komutatora. Proces ten jest na tyle skomplikowany, że w praktyce doświadczalnie dobiera się grubość szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem a biegunami pomocniczymi poprzez wstawianie przekładek magnetycznych pomiędzy jarzmem stojana i pieńkami biegunów pomocniczych.

Proces komutacji wymusza ograniczenie wartości chwilowej prądu twornika. W standardowych rozwiązaniach prąd ten nie powinien być większy od 1,2 prądu znamionowego. Efekt ten wymusza stosowanie specjalnych mechanizmów rozruchowych w przypadku silników prądu stałego.



Rys. 9 Schemat umieszczenia uzwojeń kompensacyjnych [6].

Maszyny prądu stałego o mocach 100 kW i większych mają dodatkowe uzwojenie ułożone w żłobkach w nabiegunnikach biegunów głównych (Rys. 9). Ich zastosowanie ma na celu wyrównanie rozkładu pola magnetycznego pod biegunami głównymi o praktyczną niwelację poprzecznej reakcji twornika.

Wpływ reakcji twornika nie ogranicza się do reakcji poprzecznej. W przypadku, gdy wysuniemy szczotki ze strefy geometrycznie neutralnej następują przesunięcie trójkątnego rozkładu natężenia pola magnetycznego wytworzonego przez prąd płynący w wirniku w kierunku zależnym od kierunku wysunięcia szczotek dla silnika i dla prądnicy. Zjawisko to nosi nazwę podłużnej reakcji twornika, gdyż jego efektem jest zmiana wartości wypadkowego strumienia pod biegunami. Dla silnika wysunięcie szczotek w kierunku zgodnym z ruchem wirnika spowoduje wzrost wypadkowego strumienia a w kierunku przeciwnym jego zmalenie. Dla prądnicy jest odwrotnie. Wysłunięcie szczotek ze strefy neutralnej powoduje znaczne pogorszenie procesu komutacji.

Istnienie styku ruchomego pomiędzy szczotkami a komutatorem wprowadza powoduje, że nie wolno traktować rezystancji twornika jak wartości stałej. Na styku dwóch materiałów, w przypadku maszyn prądu stałego jest to zwykle grafitowa szczotka i miedziany komutator, pojawia się tzw. napięcie przejścia. Napięcie to jest efektem różnej ruchliwości nośników prądu w obu materiałach. W przypadku maszyn elektrycznych napięcie to jest rzędu 2V. Przy nieruchomym wirniku wartość napięcia na zaciskach będzie równa:

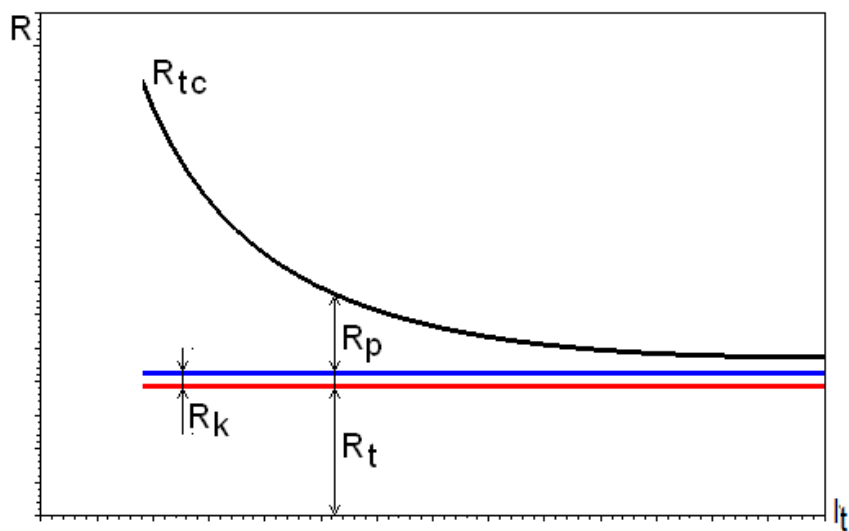
$$U_t = R_t I_t + R_k I_t + U_p \quad (1)$$

Sumę rezystancji w obwodzie twornika R_{tc} można zatem wyznaczyć z zależności (Rys. 10):

$$R_{tc} = \frac{U_t}{I_t} = R_t + R_k + \frac{U_p}{I_t} \quad (2)$$

Gdzie R_t jest rezystancją uzwojenia twornika, R_k rezystancją uzwojeń komutacyjnych a R_p jest nieliniową wartością nazywaną rezystancją przejścia:

$$R_p = \frac{U_p}{I_t} \quad (3)$$



Rys. 10 Zależność całkowitej rezystancji w obwodzie twornika od prądu 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