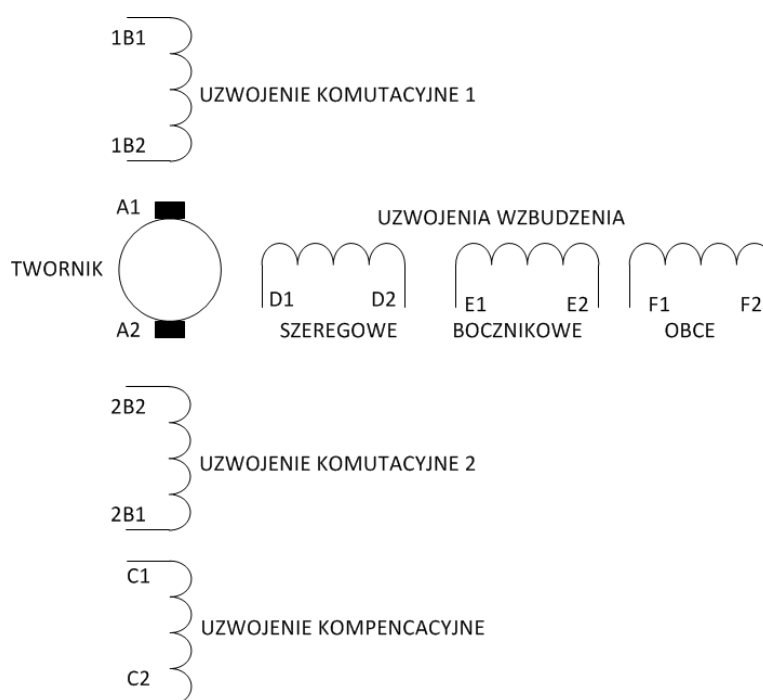


Maszyny prądu stałego – badania laboratoryjne

W maszynach prądu stałego może występować wiele uzwojeń (rys.1). W każdej maszynie jest uzwojenie twornika, komutacyjne oraz przynajmniej jedno uzwojenie wzbudzenia. Pionowo narysowane są uzwojenia, które wytwarzają pole magnetyczne w osi poprzecznej (q) poziomo narysowane są uzwojenia w osi podłużnej (d).



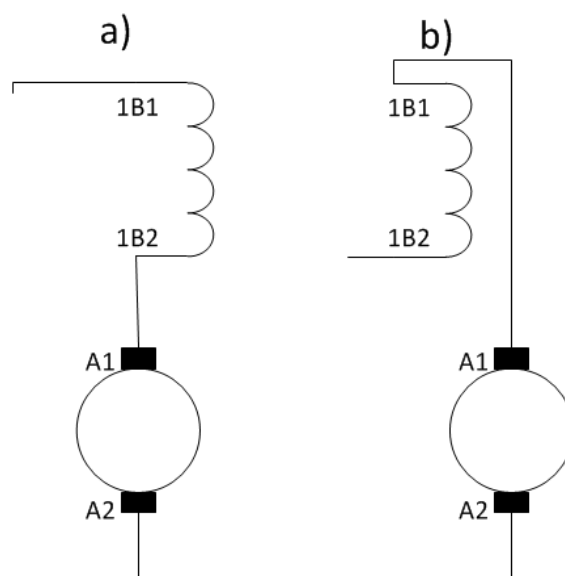
Rys. 1 Oznaczenie uzwojeń w maszynach prądu stałego

Odtwarzanie oznaczenia uzwojeń w maszynie prądu stałego związane jest z identyfikacją wzajemnego położenia uzwojeń względem uzwojenia twornika. Uzwojenie kompensacyjne występuje w maszynach o mocach większych. Dla mocy mniejszych od 100 kW uzwojenie to nie występuje. Uzwojenie obce różni się od pozostałych parametrami znamionowymi i zwykle pojawia się tam, gdzie napięcie znamionowe twornika jest różne od napięcia wzbudzenia. Uzwojenie bocznikowe zwykle jest łączone równoległe do napięcia zasilającego twornik, może być także traktowane jako obce przy zasilaniu ze źródła napięcia różnego niż napięcie twornika. Uzwojenie szeregowo często występuje łącznie z bocznikowym i wykorzystywane jest zwykle, razem z bocznikowym, (lub obcym) do kształtowania charakterystyk zewnętrznych prądnic lub mechanicznych przy pracy silnikowej.

Identyfikację uzwojeń rozpoczyna się od poszukiwania par zacisków odpowiadających poszczególnym uzwojeniom. W tym celu stosuje się induktor lub inne rozwiązania sprzętowe do sprawdzenia stanu izolacji (miernik rezystancji izolacji). W taki sposób, poza wyznaczeniem

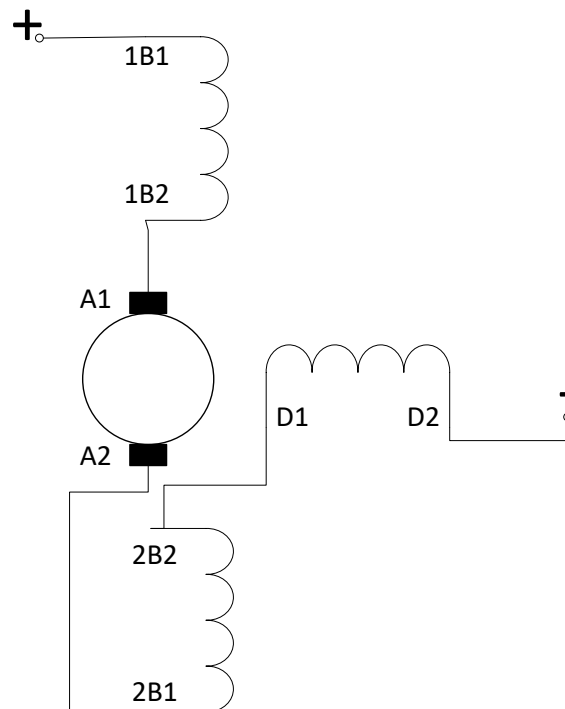
końcówek należących do poszczególnych uzwojeń, następuje też sprawdzenie stanu izolacji badanych maszyn.

Następnym krokiem jest identyfikacja uzwojenia twornika. W tym celu sprawdzamy do której pary końcówek połączony jest komutator – sprawdzamy (np. induktorem) czy jest połączenie galwaniczne pomiędzy komutatorem (lub szczotkami) a jednym z uzwojeń. Przyjmujemy dowolne oznaczenia początku i końca uzwojenia twornika. Wszystkie pozostałe uzwojenia będą oznaczane względem twornika. Następną czynnością jest pomiar rezystancji uzwojeń. Uzwojenia, które w czasie pracy maszyny są łączone szeregowo z obwodem twornika mają małe wartości rezystancji, porównywalne do rezystancji twornika. Większe wartości mają jedynie uzwojenia bocznikowe i obce. W badanej maszynie nie występuje uzwojenie obce, więc jedynym uzwojeniem o znacznie większej rezystancji ma uzwojenie bocznikowe. W literaturze opisuje się często, że rezystancje dwóch uzwojeń mają wartości podobne, są to wówczas uzwojenia komutacyjne. Rezystancja dozwolenia szeregowego może nieznacznie różnić się od komutacyjnych. W praktyce wartości tych rezystancji mogą być porównywalne i warto przeprowadzić ich identyfikacje lepszymi metodami. Bardzo wygodną metodą jest pomiar impedancji szeregowo połączonych uzwojeń wirnika i kolejnych uzwojeń o małej rezystancji. Wykonywane są dwa pomiary impedancji (rys. 2) przy badanym uzwojeniu połączonym w sposób dowolny (np. a) i odwróconym zasilaniu o 180° . Poprawna praca uzwojeń powoduje zmniejszenie wartości wypadkowego pola magnetycznego, co powoduje, że przy prawidłowym połączeniu uzwojeń komutacyjnych (podobnie uzwojenia kompensacyjnego) względem twornika impedancja ma wartość mniejszą. W przypadku uzwojenia szeregowego oraz ustawieniu szczotek w strefie neutralnej, impedancja dla obu połączeń są jednakowe. W takim przypadku (równych impedancji) należy przyjąć, że szczotki są prawidłowo ustawione.



Rys. 2 Metoda prądu zmiennego identyfikacji uzwojeń komutacyjnych

W większości maszyn prądu stałego, mechanizm szczotkotrzymaczy może być nieznacznie przemieszczony z położenia w strefie neutralnej. Przypadek nieznacznych różnic w pomiarze impedancji dla trzeciego uzwojenia wskazuje, że szczotki są wysunięte ze strefy neutralnej i należy je poprawnie ustawić. Wyznaczenie początków i końców uzwojeń wzbudzenia związane jest z wykorzystaniem norm, które określają kierunek wirowania maszyny jako „prawy”. Silnik należy połączyć jak do normalnej pracy i dokonać rozruchu maszyny. W przypadku uzwojenia szeregowego należy szeregowo połączyć je z uzwojeniem twornika (rys.3) i zwiększać wartość prądu twornika do momentu, gdy wirnik zacznie się obracać. Nie wolno dopuścić do pełnego rozruchu przy znamionowym napięciu gdyż grozi to rozbiegiem maszyny ponad dopuszczalną prędkość. Poprawne połączenie występuje wówczas, gdy wirnik obraca się w prawo.



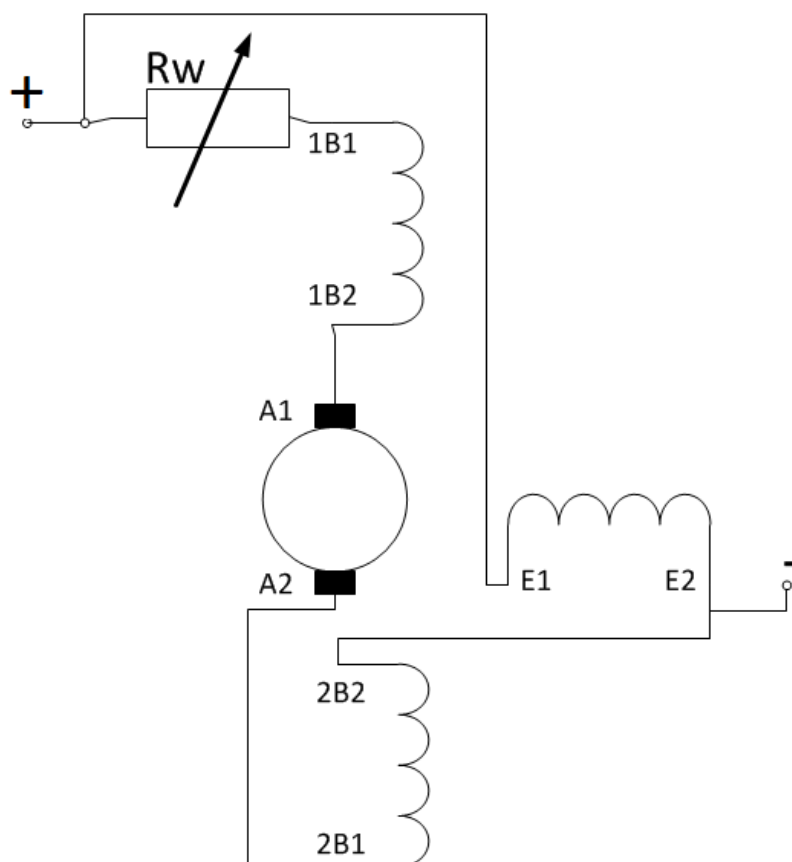
Rys. 3 Połączenie uzwojeń silnika szeregowego

Prawidłowy kierunek obrotu, zgodnie z normami, oznacza ruch maszyny w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara w sytuacji, gdy patrzymy na maszynę:

- w kierunku zaznaczonym strzałką na obudowie silnika
- od strony napędu (maszyny roboczej)
- od strony wyprowadzonego wału maszyny
- od strony przeciwnej do komutatora lub pierścieni zwierających

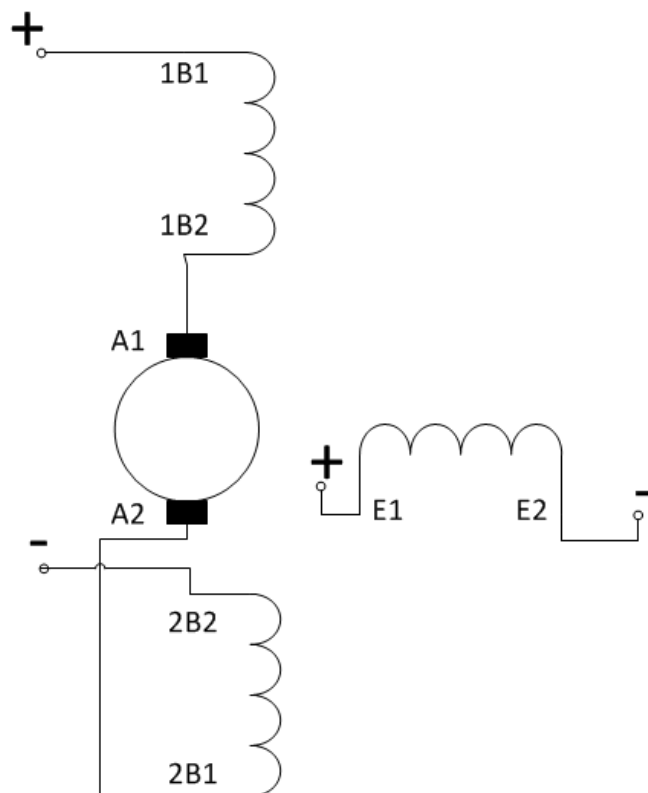
Poprawnie przeprowadzony rozruch dla silnika bocznikowego wymaga zastosowania rozruchu rezystancyjnego (rys.4). Jako rezystor rozruchowy może być użyty opornik wodny.

Uzwojenie bocznikowe można także użyć jako obce i wówczas można połączyć układ z dwóch różnych źródeł napięcia stałego i połączyć według schematu pokazanego na rysunku 5.



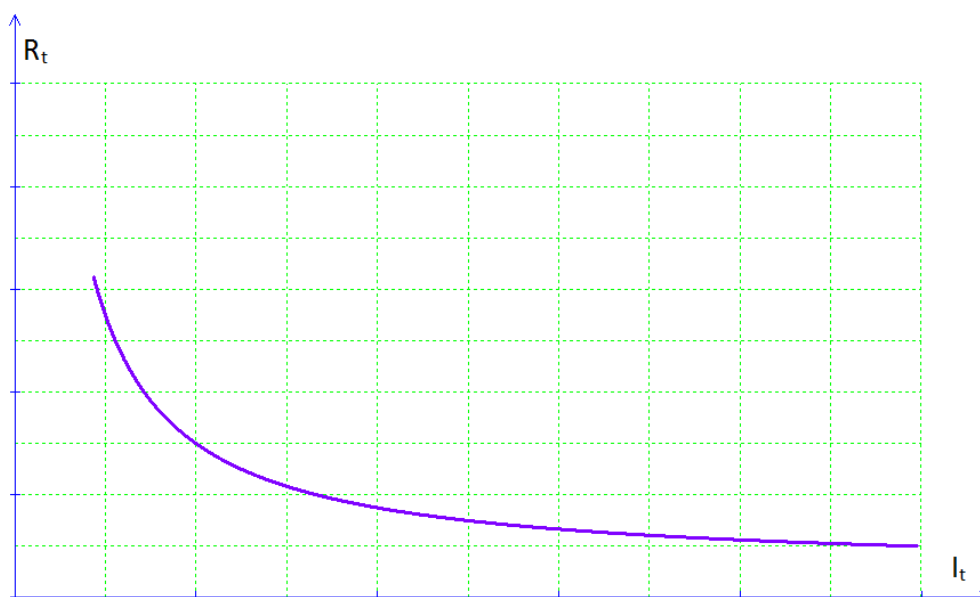
Rys. 4 Schemat połączeń uzwojeń silnika bocznikowego

W sytuacji, gdy zostanie stwierdzone wysunięcie szczotek ze strefy neutralnej, przed sprawdzeniem kierunku wirowania wirnika należy ustawić prawidłowo szczotki. Jednym ze sposobów może być wykorzystanie podłużnej reakcji twornika. W tym celu należy zasilić sam twornik prądem mniejszym od znamionowego oraz wysuwać szczotki ze strefy neutralnej w jednym kierunku aż do momentu, gdy wirnik zacznie się obracać. Zaznaczamy położenie szczotek i postępujemy podobnie przesuując szczotki w drugą stronę aż do rozpoczęcia ruchu wirnika. Pozycja wyznaczona pomiędzy zaznaczonymi położeniami jest miejscem, do którego szczotki trzeba przesunąć. Podobne postępowanie można przeprowadzić korzystając z faktu wystąpienia sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniem (dowolnym) wzbudzenia a twornikiem. Metodą np. komutacji prądu stałego w uzwojeniu wzbudzenia, sprawdzić indukowanie się napięcia po stronie twornika. Wysuwać szczotki kolejno w obu kierunkach aż do uzyskania widocznego efektu. Położenie pośrednie wyznaczy strefę neutralną.



Rys. 5 Schemat połączeń uzwojeń silnika obcowzbudnego

W maszynie prądu stałego występują straty mechaniczne, straty w żelazie i w uzwojeniach. Znajomość wyznaczenia poszczególnych strat potrzebna jest do wyznaczenia sprawności jak i oszacowania momentu wytwarzanego w maszynie. Straty w uzwojeniu twornika wyznaczamy poprzez pomiar rezystancji metodą techniczną oraz wyznaczenie charakterystyki rezystancji od wartości prądu twornika.



Rys. 6 Zależność rezystancji w obwodzie twornika od wartości prądu twornika.

Straty w uzwojeniu twornika liczymy z zależności:

$$\Delta P_t = R_t I_t^2 \quad (1)$$

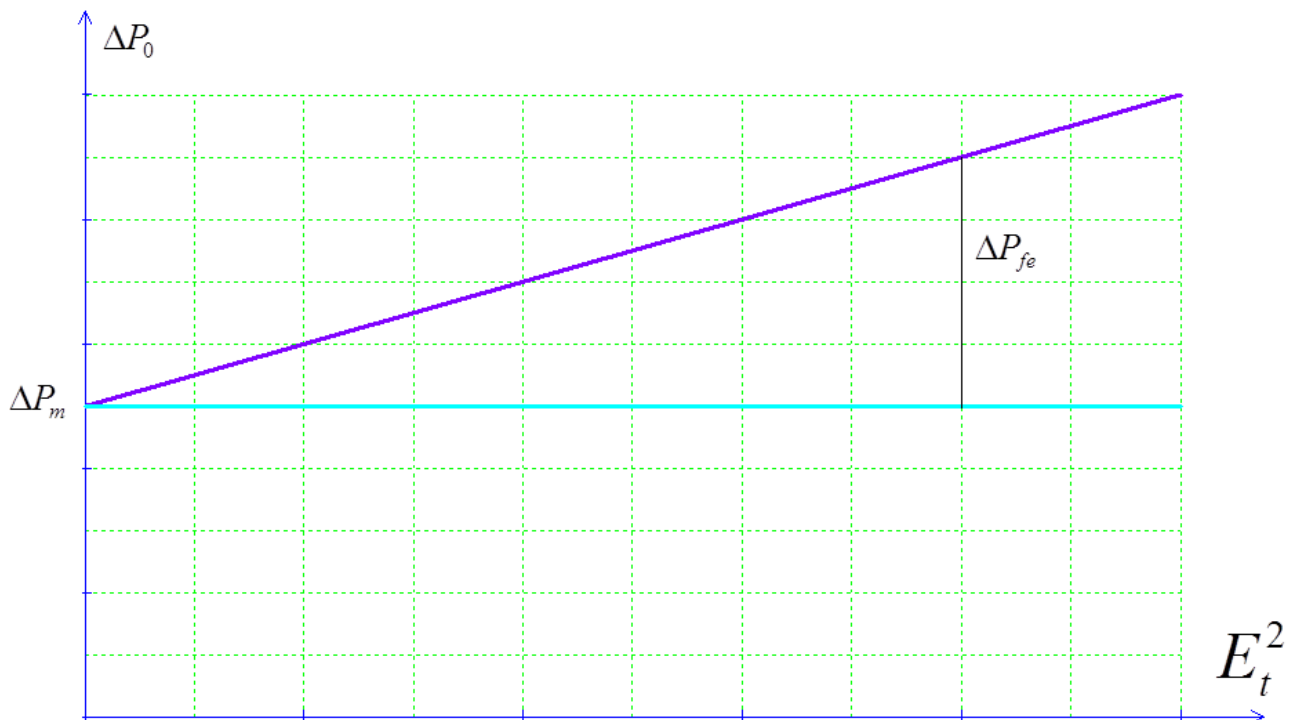
Straty mechaniczne oraz w żelazie wyznaczamy w sposób podobny do analizy biegu jałowego maszyny indukcyjnej. W maszynie prądu stałego wykonujemy próbę biegu jałowego przy pracy silnikowej. Straty w żelazie są tu proporcjonalne do prędkości obrotowej, podobnie jest ze stratami mechanicznymi, stąd próbę należy przeprowadzić w taki sposób, by utrzymać stałą prędkość obrotową wirnika. Badania rozpoczynamy od napięcia znamionowego i przy obniżaniu napięcia zmniejszamy jednocześnie prąd wzbudzenia. W ten sposób utrzymujemy stałą wartość prędkości obrotowej i zachowujemy stałe wartości strat mechanicznych. Wartość maksymalna indukcji jest tu proporcjonalna do strumienia, więc zgodnie z faktem że straty w żelazie są proporcjonalne do kwadratu indukcji, obliczamy wartość siły elektromotorycznej:

$$E_t = U_t - R_t I_t \quad (2)$$

Rysujemy charakterystykę strat jałowych, obliczonych z próby biegu jałowego (napięcia U_t oraz prądu I_t) oraz szacowanych strat w tworniku:

$$\Delta P_0 = U_t I_t - \Delta P_t \quad (3)$$

Przedłużenie linii prostej do przecięcia się z osią OY wyznacza wartość strat mechanicznych dla danej prędkości obrotowej.



Rys. 7 Sposób wyznaczenia strat mechanicznych i strat w żelazie.

Próby powtarzamy dla różnych wartości prędkości obrotowych i wykreślamy zależność strat mechanicznych od prędkości. Mając dostępne informacje o wartości strat w żelazie przy różnych wartościach prędkości możemy rozdzielić straty w żelazie na prądy wirowe i histerezę. Jeżeli np. przy tej samej wartości siły elektromotorycznej, a więc tej samej wartości indukcji, zmierzymy straty w żelazie przy dwóch różnych prędkościach obrotowych (P_{fe1} przy prędkości ω_1 i P_{fe2} przy prędkości ω_2) to możemy napisać układ równań:

$$P_{fe1} = c_h \omega_1 + c_w \omega_1^2 \quad (4)$$

$$P_{fe2} = c_h \omega_2 + c_w \omega_2^2 \quad (5)$$

Zależność ta jest związana z faktem, że straty na histerezę są proporcjonalne do częstotliwości (w tym przypadku do prędkości obrotowej) a straty na prądy wirowe do kwadratu częstotliwości. Na podstawie tych równań możemy wyznaczyć stałe c_h i c_w .

$$c_h = \frac{P_{fe1} \omega_2^2 - P_{fe2} \omega_1^2}{\omega_1 \omega_2^2 - \omega_2 \omega_1^2} \quad (6)$$

$$c_w = \frac{P_{fe2} \omega_1 - P_{fe1} \omega_2}{\omega_1 \omega_2^2 - \omega_2 \omega_1^2} \quad (7)$$

Otrzymując w ten sposób zależność na straty w żelazie przy dowolnej prędkości kątowej ω .

$$P_{fe} = c_h \omega + c_w \omega^2 \quad (8)$$

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