



MASZYNY ELEKTRYCZNE 2

*MASZYNY PRĄDU STAŁEGO
MASZYNY SYNCHRONICZNE*

Adam Sołbut
a.solbut@pb.edu.pl

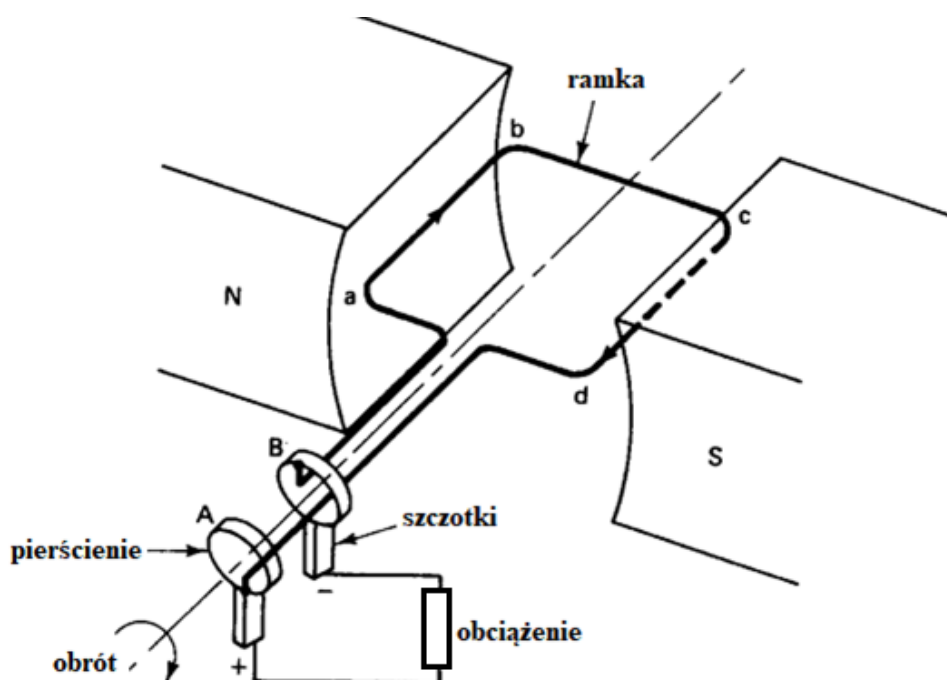
Spis treści

1. Maszyny prądu stałego	2
1.1. Zasada działania	2
1.2. Budowa maszyn prądu stałego	7
1.3. Reakcja twornika	12
1.4. Komutacja	15
1.5. Rezystancja w obwodzie twornika	19
1.6. Charakterystyki mechaniczne silników i zewnętrzne generatorów	20
1.7. Dynamika maszyn prądu stałego	34
1.8. Silnik uniwersalny	39
1.9. Badania laboratoryjne maszyn prądu stałego	42
1.10. Maszyny specjalne	49
2. Maszyny synchroniczne	56
2.1. Maszyny synchroniczne - budowa	56
2.2. Schemat zastępczy maszyny cylindrycznej (turbogenerators)	61
2.3. Praca samotna	63
2.4. Synchronizacja generatora z siecią elektroenergetyczną	70
2.5. Praca maszyny synchronicznej na sieć sztywną	71
2.6. Reaktancja Potiera	74
2.7. Wykres Potiera	76
2.8. Maszyna synchroniczna jawnobiegunowa (hydrogenerator)	78
2.9. Próba małego poślizgu	81
2.10. Obciążenie niesymetryczne generatora synchronicznego	82
2.11. Wprowadzenie do dynamiki maszyn synchronicznych	85
2.12. Zwarcie udarowe generatora synchronicznego	93
2.13. Rozruch asynchroniczny maszyny synchronicznej	96
2.14. Uwagi ogólne	101
Bibliografia	103
Spis ilustracji	104

1. Maszyny prądu stałego

1.1. Zasada działania

Zasada działania maszyn elektrycznych opiera się na podstawowych zjawiskach i prawach fizyki [13]. Ruch ramki ze stałą prędkością w polu magnetycznym (rys. 1.1) powoduje, że w ramce indukuje się napięcie (sem - siła elektromotoryczna rotacji). Jeśli końce ramki podłączymy do poruszających się razem z ramką pierścieni stykających się z nieruchomymi szczotkami, to napięcie na szczotkach będzie zmieniało się w sposób wynikający z rozkładu pola magnetycznego pod biegunami.



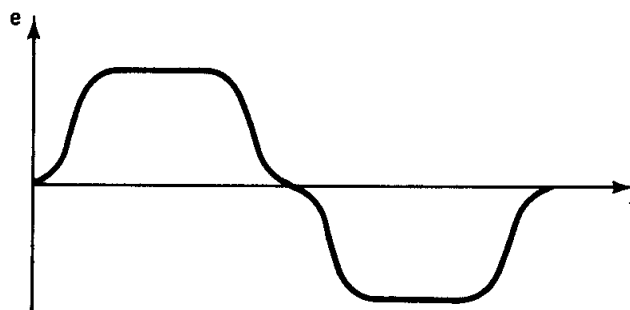
Rys. 1.1. Zasada działania generatora prądu przemiennego [16]

Obrót ramki będzie powodował powstanie wartości chwilowej napięcia pokazanego na rys. 1.2. Uzyskujemy napięcie przemiennie, które podłączone do zewnętrznego obwodu będzie powodowało przepływ prądu przemiennego w czasie. Napięcie to będzie zmieniało swoją wartość i kierunek proporcjonalnie do prędkości wirowania wału wirnika. Wartość częstotliwości f można wyznaczyć z proporcji identycznych jak w przypadku prędkości synchronicznej w maszynach indukcyjnych (asynchronicznych) [13]:

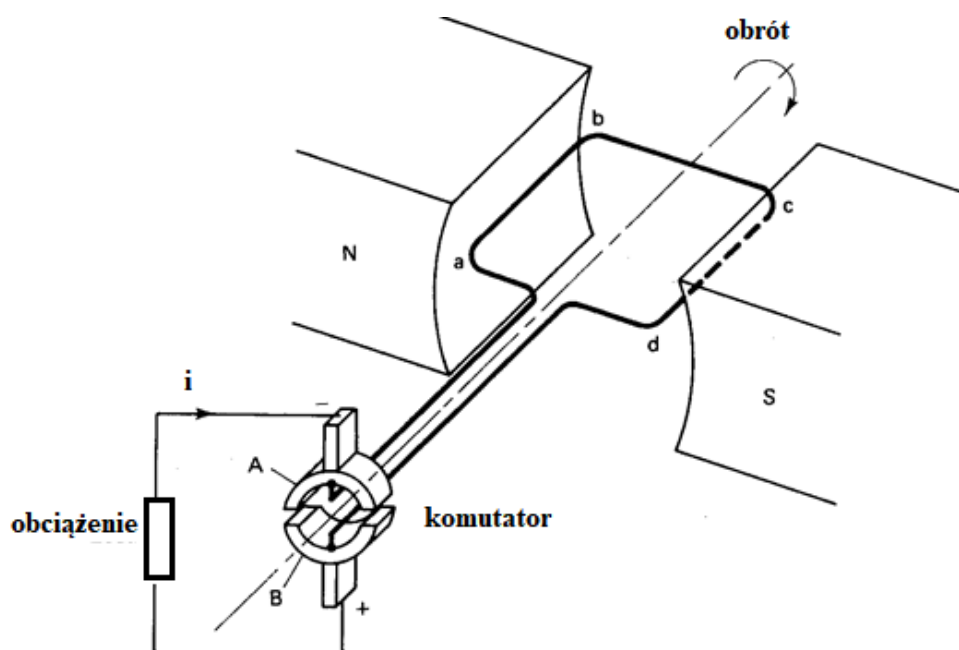
$$f = \frac{pn}{60}, \quad (1.1)$$

gdzie n jest prędkością obrotową wału wirnika w obr/min a p liczbą par biegunów.

W sytuacji, gdy budujemy maszynę jako generator prądu przemiennego (maszyna synchroniczna), postępujemy w taki sposób, by napięcie na jego zaciskach, przy stałej prędkości kątowej, zmieniało się sinusoidalnie.



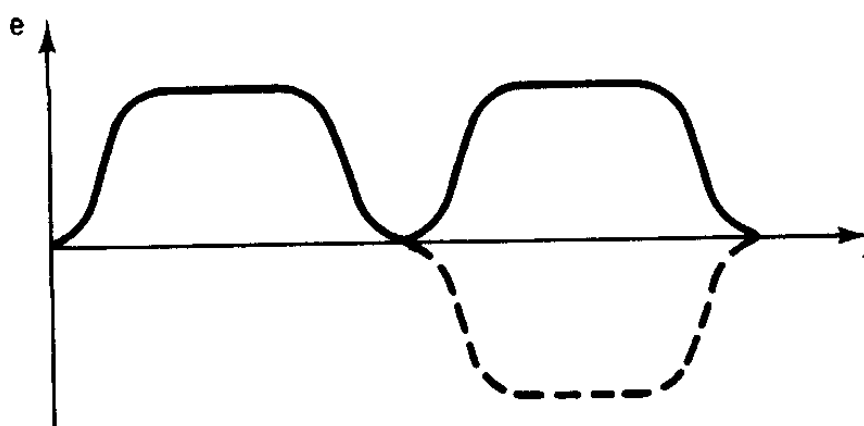
Rys. 1.2. Napięcie indukowane w generatorze prądu przemiennego [16]



Rys. 1.3. Istota działania komutatora [16]

W przypadku, gdy przetniemy pierścienie na dwie części i zrezygnujemy z podłączenia końcówek wirującej ramki do pierścieni na rzecz przyłączenia końcówek w sposób pokazany na rys. 1.3, otrzymamy urządzenie mechaniczne, które obracając się z ramką będzie powodowało zachowanie stałego kierunku napięcia pomiędzy szczotkami. Urządzenie to nosi nazwę komutatora i w przypadku pracy generatorowej spowoduje, że przebieg napięcia pomiędzy szczotkami będzie jednokierunkowy (rys. 1.4). W takiej maszynie dążymy do zmiany napięcia przemiennego indukowanego w uzwojeniu wirnika na napięcie jednokierunkowe (najlepiej o wartości stałej). Nie ma tu konieczności

zapewnienie sinusoidalnego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Z uwagi na optymalne wykorzystanie rdzenia magnetycznego dąży się tu do wytworzenia maksymalnej wartości strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika. W praktyce rozkład pola magnetycznego, a co za tym idzie napięcia indukowanego w wirniku, ma przebieg bliski trapezoidalnego (rys. 1.4). Celem budowy takiej maszyny jest wykorzystanie napięć i prądów, które w stanie ustalonym powinny mieć wartości stałe w czasie. Maszyny takie nazywamy maszynami prądu stałego.



Rys. 1.4. Napięcie pomiędzy szczotkami w maszynie prądu stałego [16]

Napięcia indukowane są skutkiem zmiany strumienia skojarzonego z ramką w czasie:

$$e = \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.2)$$

Jeśli zmiana strumienia następuje wskutek zmian wartości indukcji magnetycznej przy nieruchomym uzwojeniu, napięcie tak indukowane nazywamy siłą elektromotoryczną transformacji [13]. W przypadku, gdy zmiana strumienia skojarzonego z danym uzwojeniem następuje na skutek zmiany położenia uzwojenia, napięcie indukowane nazywamy siłą elektromotoryczną rotacji. Przy założeniu, że oba ramiona ramki znajdują się w polu magnetycznym o identycznej wartości B , zmiana strumienia skojarzonego z ramką będzie zależała od prędkości przemieszczenia ramki w czasie, stąd:

$$d\psi = 2Bl dx, \quad (1.3)$$

gdzie l jest długością pręta umieszczonego w polu magnetycznym o indukcji B , dx przemieszczeniem ramki w czasie dt . Wartość napięcia indukowanego w ramce jest równa:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = 2Bl \frac{dx}{dt} = 2Blv = BlD\omega = \phi\omega. \quad (1.4)$$

Wartość siły elektromotorycznej rotacji jest zatem proporcjonalna do prędkości kątowej oraz wartości strumienia skojarzonego z ramką. W rzeczywistej maszynie istnieje wiele (k) ramek połączonych szeregowo, których pręty znajdują się w podobnych warunkach magnetycznych. Wartość napięcia indukowanego w i -tej ramce jest równa:

$$e_{ti} = \phi_i \omega. \quad (1.5)$$

Wartość napięcia indukowanego w całym tworniku można zatem wyrazić zależnością:

$$e_t = \sum_{i=1}^k e_{ti} = \sum_{i=1}^k \phi_i \omega = k \phi \omega, \quad (1.6)$$

przy czym ϕ jest wartością średnią strumienia magnetycznego skojarzonego z ramkami. Podłączenie do szczotek obciążenia (rezystancji) spowoduje przepływ prądu elektrycznego o wartości i_t (prąd twornika). Wartość siły działającej na pojedynczy pręt i -tej ramki jest zależna od długości pręta l poruszającego się w polu oraz indukcji B i wartości prądu twornika:

$$F_i = B_i i_t l. \quad (1.7)$$

Moment elektromagnetyczny działający na i -tą ramkę jest równy:

$$M_{ei} = F_i D = B_i i_t l D \quad (1.8)$$

Podobnie jak w przypadku napięcia indukowanego w tworniku, wartość wypadkową momentu elektromagnetycznego można wyznaczyć z zależności:

$$M_e = \sum_{i=1}^k M_{ei} = \sum_{i=1}^k B_i i_t l D = \sum_{i=1}^k \phi_i i_t = k \phi i_t. \quad (1.9)$$

Przy pracy maszyny jako generatora działanie komutatora można porównać do wielofazowego prostownika. Przy pracy silnikowej przyłączenie zewnętrznego napięcia do szczotek wymusi przepływ prądu przez uzwojenie twornika. Komutator powoduje, że wartość prądu pod prętami umieszczonymi pod danym biegunem ma zawsze ten sam kierunek. W pojedynczym pręcie twornika płynie prąd o kierunku zależnym od pozycji pręta względem pola magnetycznego. Częstotliwość zmian prądu w pręcie twornika jest proporcjonalna do prędkości wirowania wirnika.

Równanie Kirchhoffa dla obwodu twornika, przy założeniu, że maszyna pracuje jako silnik, przyjmuje postać:

$$u_t = R_t i_t + e_t + L_t \frac{di_t}{dt}, \quad (1.10)$$

gdzie u_t jest napięciem zasilającym obwód twornika, R_t jest rezystancją obwodu twornika, L_t indukcyjnością własną obwodu twornika a e_t napięciem indukowanym w uzwojeniach wirnika widzianym od strony stacjonarnej (od strony szczotek).

Pole magnetyczne w maszynie może być wynikiem umieszczenia na obwodzie stojana magnesów trwałych [4] i wówczas taką maszynę nazywamy magnetoelektryczną. Pole magnetyczne może być także wytworzone przez prąd stały płynący w elektromagnesach umieszczonych na obwodzie stojana. Taka maszyna nazywana jest maszyną o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Równanie obwodu wzbudzenia można przedstawić zależnością:

$$u_w = R_w i_w + L_w \frac{di_w}{dt}, \quad (1.11)$$

gdzie u_w jest napięciem zasilającym obwód wzbudzenia, i_w wartością chwilową prądu, R_w jest rezystancją tego obwodu a L_w indukcyjnością własną obwodu wzbudzenia. Równania maszyny należy uzupełnić o równanie dynamiki dla ruchu obrotowego (przy stałej wartości momentu bezwładności J):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_o = k\phi i_t - M_o. \quad (1.12)$$

Analiza pracy maszyn prądu stałego w stanach ustalonych umożliwia uproszczenie wyprowadzonych wyżej równań, przyjmując, że w stanie ustalonym prędkość nie zmienia się w czasie, wówczas:

$$J \frac{d\omega}{dt} = 0. \quad (1.13)$$

Moment wytworzony w maszynie w stanie ustalonym (moment elektromagnetyczny M_e), jest równy momentowi obciążenia:

$$M_e = M_o = k\phi I_t. \quad (1.14)$$

W przypadku pracy silnikowej wartość prądu płynącego w tworniku jest wymuszona momentem obciążenia i wartością strumienia $k\phi$. Napięcie indukowane w obwodzie twornika jest wynikiem różnicy napięcia zasilającego twornika oraz spadku napięcia na rezystancji w obwodzie twornika:

$$E_t = U_t - R_t I_t. \quad (1.15)$$

Prędkość obrotową, przy pracy silnikowej, można wówczas obliczyć z zależności:

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi}. \quad (1.16)$$

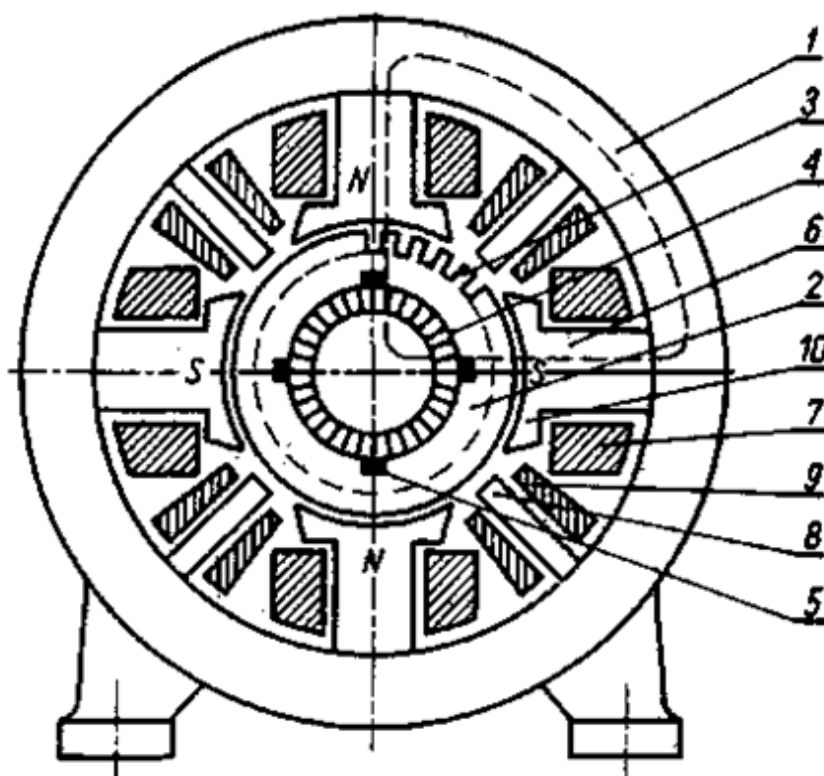
W przypadku pracy maszyny jako prądnicy, prędkość obrotowa jest wymuszona przez turbinę, a napięcie na zaciskach jest różnicą napięcia indukowanego w tworniku E_t oraz spadku napięcia na rezystancji w obwodzie twornika:

$$U_t = E_t - R_t I_t, \quad (1.17)$$

$$U_t = k\phi\omega - R_t I_t. \quad (1.18)$$

1.2. Budowa maszyn prądu stałego

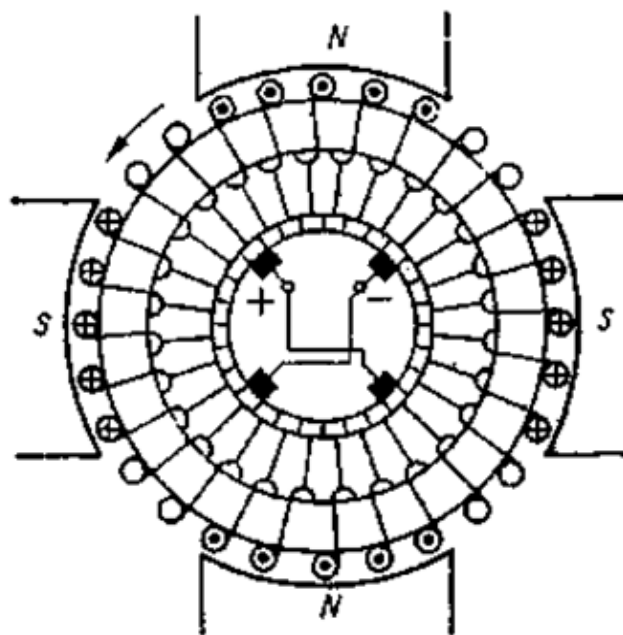
Przykładową konstrukcję maszyny prądu stałego pokazano w przekroju na rys. 1.5.



Rys. 1.5. Przekrój maszyny prądu stałego [10]:

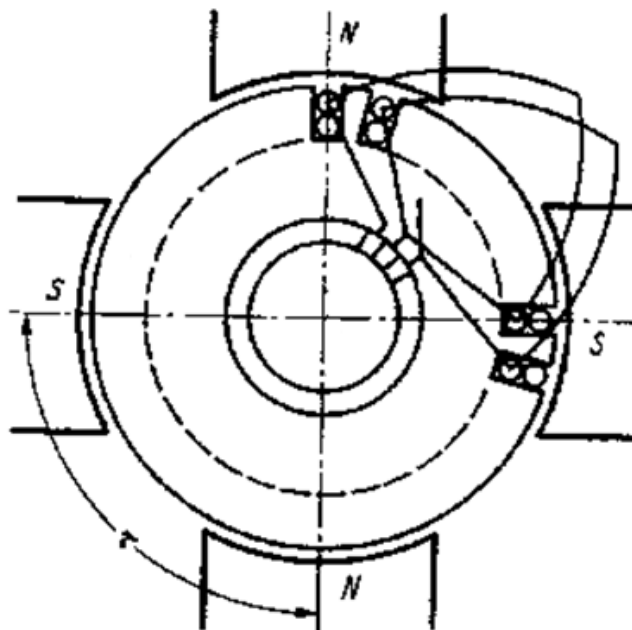
1 — jarzmo stojana, 2 — jarzmo wirnika, 3 — zęby, 4 — komutator, 5 — szczotki, 6 — bieguny, 7 — uzwojenie wzbudzenia, 8 — bieguny pomocnicze, 9 — uzwojenie biegunów pomocniczych, 10 — nabiegunniki

Obudowę zewnętrzną stanowi jarzmo stojana (1). Jarzmo stojana stanowi drogę dla pola magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenia wzbudzenia (7) nawinięte na bieguny główne (6). Jako że pole magnetyczne jest tu wartością stałą, jarzmo stojana zbudowane jest zwykle z litego materiału ferromagnetycznego (odlew staliwny lub żeliwny). Do jarzma stojana mocowane, są zwykle bieguny główne, składające się z litych pieńków biegunów głównych, na których nawijane są uzwojenia wzbudzenia oraz z nabiegunników. Zadaniem nabiegunników jest rozłożenie pola magnetycznego na jak największym obszarze nad wirnikiem. Nabiegunniki są blachowane co wynika z występowania strat na prądy wirowe i histerezę, pojawiające się tu na skutek żłobkowania wirnika, i następnie tego faktu w postaci lokalnych oscylacji pola magnetycznego.

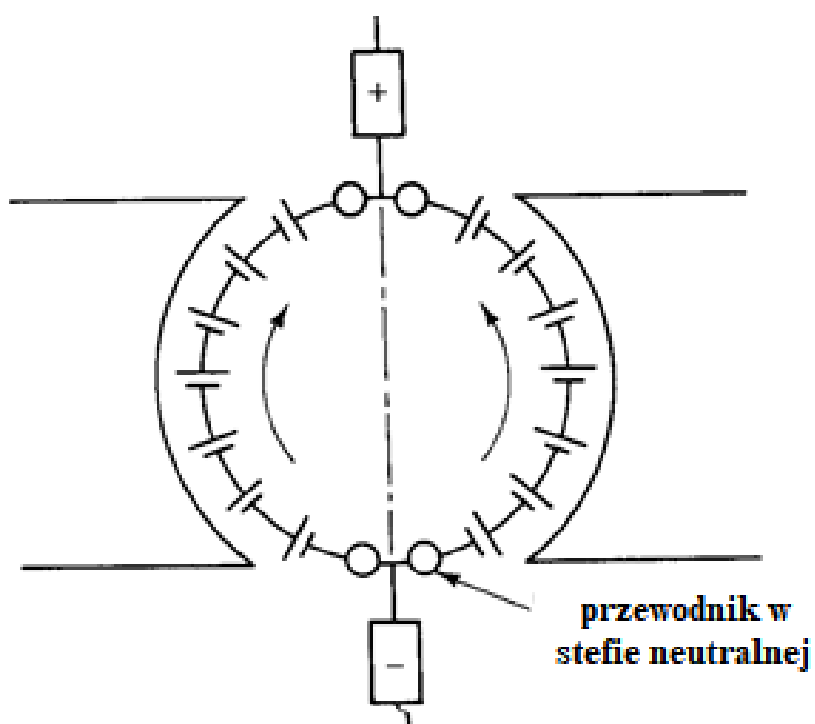


Rys. 1.6. Uzwojenie pierścieniowe wirnika [10].

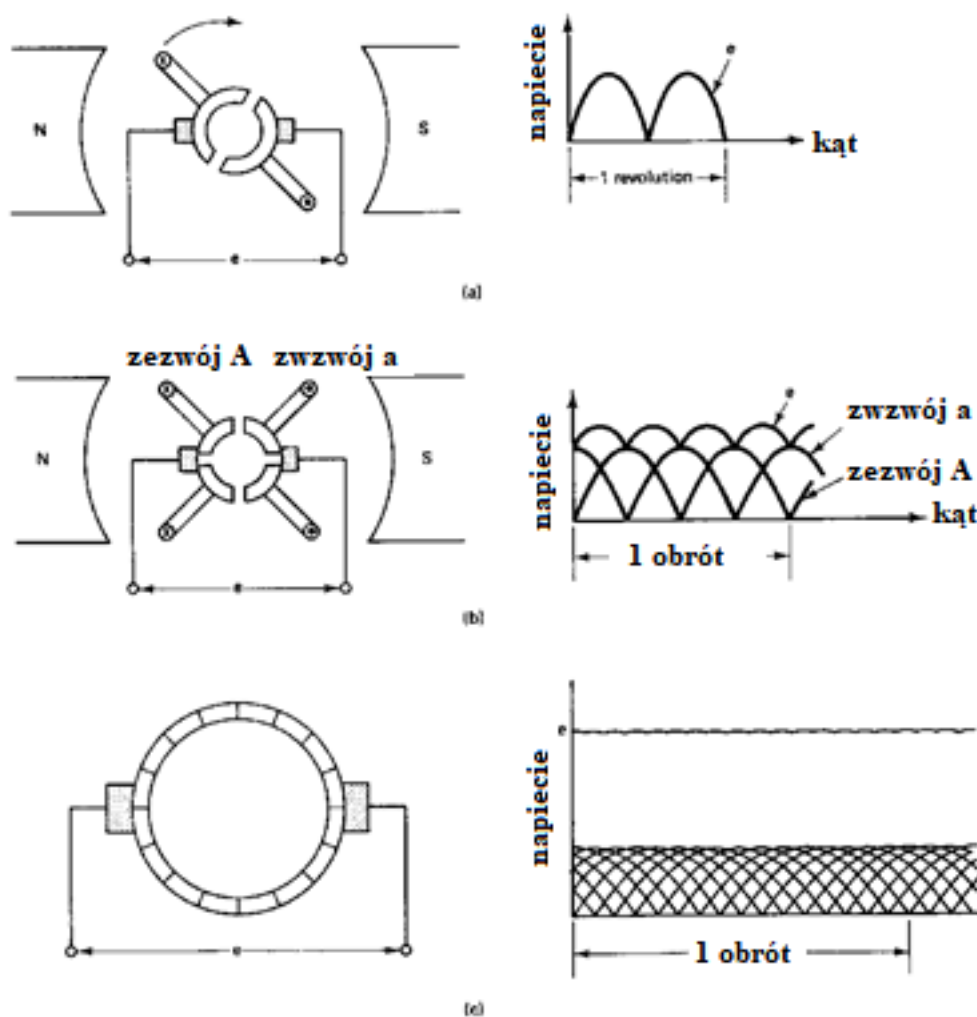
Do jarzma stojana mocowane są także mniejsze bieguny pomocnicze (komutacyjne). Ich zadaniem jest polepszenie jakości komutacji, czyli procesów zachodzących w czasie zmiany kierunku prądu w zezwojach, których pręty zmieniają pozycję, przemieszczając się ze strefy biegunów S na N (i odwrotnie). Wirnik maszyny jest zbudowany z ferromagnetycznego rdzenia, w którym w żłobkach umieszczone jest uzwojenie twornika. Blachowanie wirnika jest niezbędne dla ograniczenia strat od prądów wirowych, które są wynikiem zmian wartości i kierunku magnesowania na skutek wirowania wirnika względem pola magnetycznego. Jeden z pierwszych typów uzwojenia wirnika (tzw. uzwojenie pierścieniowe Gramma) pokazano na rys. 1.6. Końce wyprowadzeń każdego z zezwojów tego uzwojenia podłączone są do kolejnych wycinków komutatora. Uzwojenie jest uzwojeniem zamkniętym. Taka konstrukcja uzwojeń umożliwia obrót wirnika przy jednoczesnym zapewnieniu stałego kierunku prądu płynącego przez pręty ułożone pod danym biegunem (istota działania komutatora). W uzwojeniach takich część uzwojenia (wewnątrz pierścienia) jest nieaktywna, stąd współcześnie stosuje się tzw. uzwojenia bębnowe (rys. 1.7), które w optymalny sposób wykorzystują materiał czynny uzwojeń.



Rys. 1.7. Uzwojenie bębnowe wirnika [10]



Rys. 1.8. Wypadkowe napięcie indukowane w maszynie prądu stałego [2]



Rys. 1.9. Zależność oscylacji napięcia indukowanego w wirniku od liczby wycinków komutatora [2]

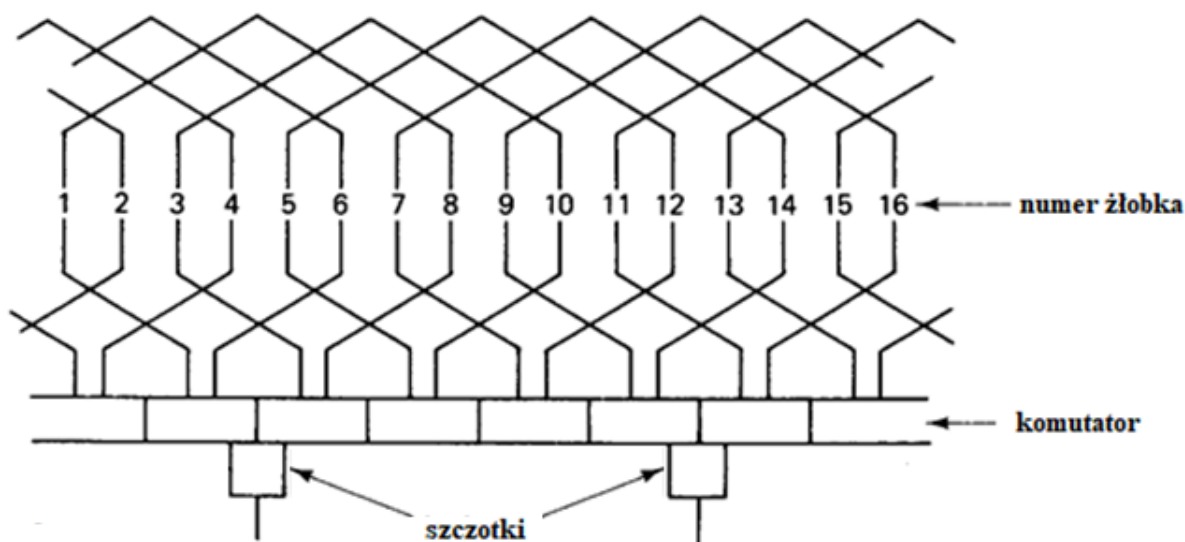
Taka konstrukcja uzwojenia wirnika powoduje, że napięcie pomiędzy szczotkami jest sumą szeregowo połączonych zewzójów umieszczonych w żłobkach (rys. 1.8). Wypadkowa wartość siły elektromotorycznej jest tu praktycznie wartością stałą, gdyż pulsacje napięcia są tym mniejsze im więcej jest żłobków i wycinków komutatora (rys. 1.9). Praktycznie budowane maszyny prądu stałego mają stosunkowo dużą liczbę żłobków i wycinków komutatora. Budowa uzwojeń wirnika ([9], [10]) maszyn wymuszona jest przez między innymi: wartości napięcia i prądu znamionowego, jakości komutacji, dopuszczalny poziom oscylacji w przebiegach napięć i prądów, mocy maszyny.

Przykładowy sposób rozłożenia uzwojeń w żłobkach wirnika, wraz z połączeniami uzwojeń do wycinków komutatora pokazano na rys. 1.10 (tzw. schemat Richtera) i rys. 1.11 (schemat Arnolda). W maszynach dużej mocy (powyżej 100kW) stosowane jest uzwojenie kompensacyjne. Jest ono umieszczone w żłobkach wyciętych w nabiegunnikach biegunów głównych. Ich celem jest ograniczenie wpływu prądu płynącego przez uzwojenie wirnika na

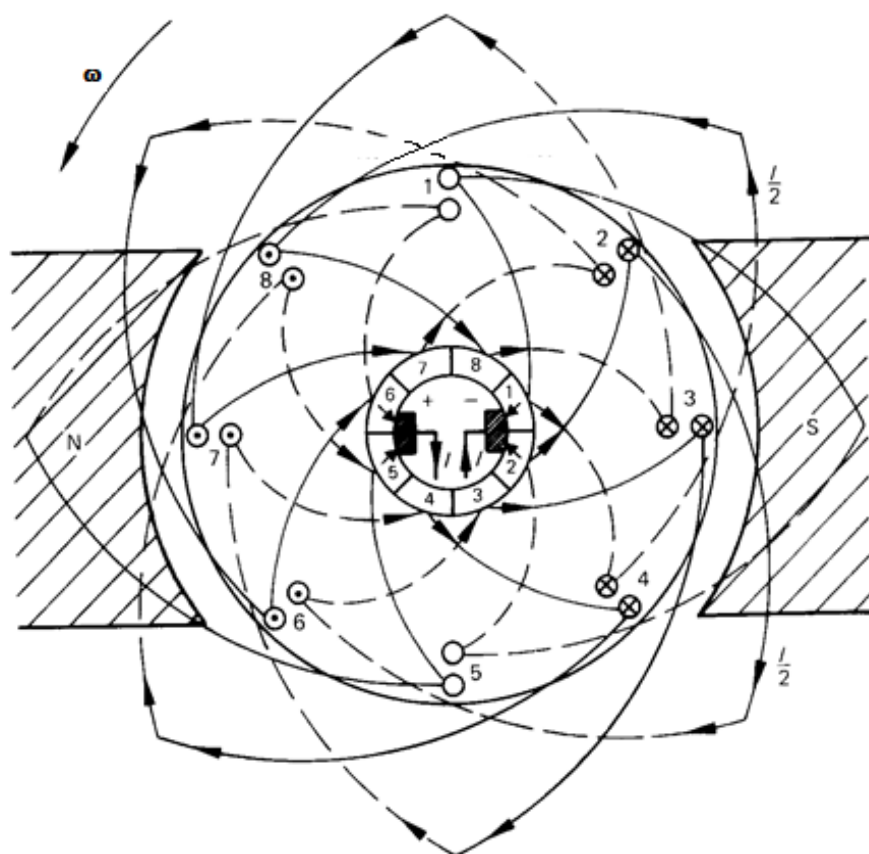
wypadkowy rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej pomiędzy stojanem i wirnikiem w maszynach prądu stałego (reakcja twornika).

Uzwojenia wzbudzenia mogą być w różny sposób łączone z uzwojeniem twornika. Jeśli uzwojenia te stanowią dwa oddzielne obwody, to maszynę nazywamy obcowzbudną. Przy równoległym ich połączeniu mówimy o maszynie bocznikowej. Przy połączeniu szeregowym mówimy o maszynie szeregowej. W praktyce stosuje się także łączenia mieszane (maszyna bocznikowa z dozwojeniem szeregowym i inne). Oznaczenia końców i początków uzwojeń w maszynach prądu stałego są normalizowane:

- twornik maszyny prądu stałego: A1 – A2,
- zwojenie biegunów komutacyjnych: B1 – B2 ($1B1 - 1B2 + 2B1 - 2B2$),
- uzwojenie kompensacyjne: C1 – C2,
- uzwojenie wzbudzenia szeregowe: D1 – D2,
- uzwojenie wzbudzenia bocznikowe: E1 – E2,
- uzwojenie obcowzbudne: F1 – F2,
- uzwojenie dodatkowe w osi podłużnej: H1 – H2,
- uzwojenie dodatkowe w osi poprzecznej: J1 – J2.



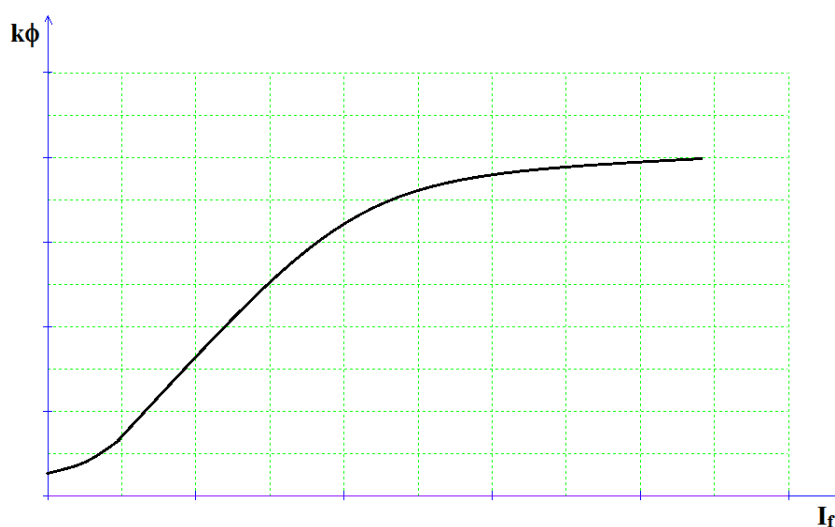
Rys. 1.10. Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Richtera) [2]



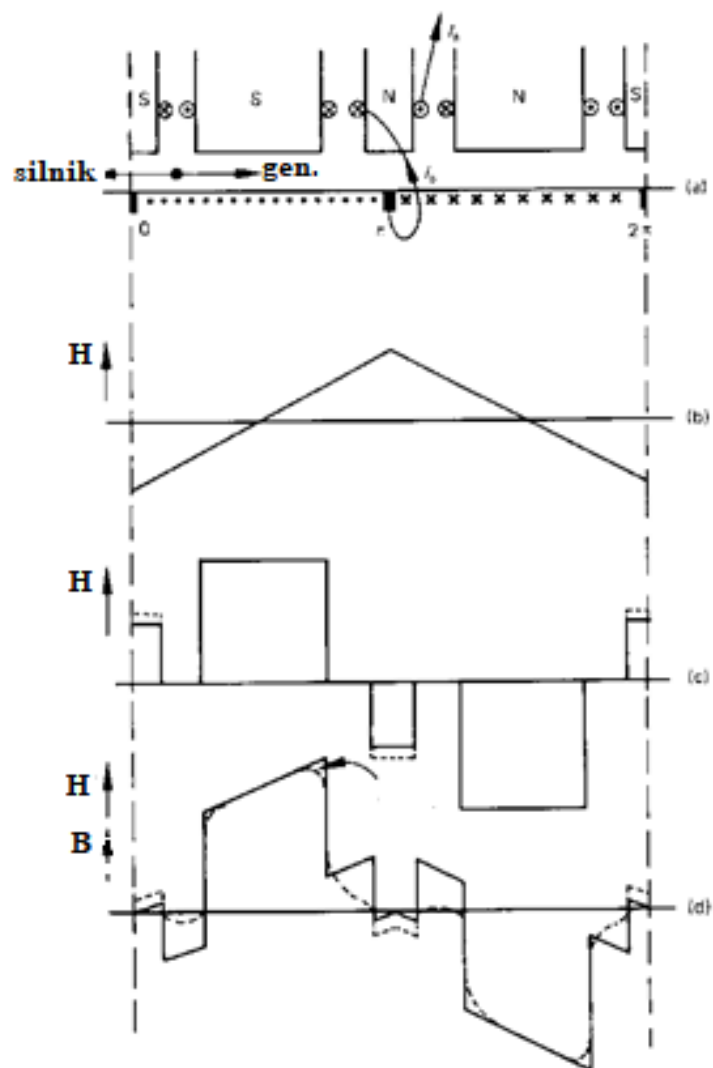
Rys. 1.11. Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Arnolda) [2]

1.3.Reakcja twornika

W maszynach prądu stałego niezbędne jest uwzględnienie zjawisk wynikających z krzywej magnesowania oraz rzeczywistego rozkładu pola magnetycznego w szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem. Na rys. 1.12 pokazano praktyczną zależność strumienia magnetycznego od wartości prądu wzbudzenia w maszynie prądu stałego. Pole magnetyczne wytwarzane jest przez prądy płynące w obwodach. Podstawowym czynnikiem wymuszającym powstanie pola magnetycznego w maszynie prądu stałego jest obwód wzbudzenia. W przypadku obciążenia maszyny prąd twornika powoduje zmianę rozkładu pola na obwodzie maszyny. Na rys. 1.13 pokazano uproszczony rozkład pola magnetycznego wytwarzanego przez bieguny główne oraz bieguny komutacyjne (pomocnicze) (rys. 1.13.c). Na rysunkach tych przyjęto uproszczenia, zakładając równomierność szczeliny powietrznej oraz liniowy rozkład prądu na obwodzie wirnika. Wypadkowy kształt siły magnetomotorycznej (linia ciągła rys. 1.13,d) oraz przybliżony rozkład wartości indukcji (linia przerywana rys. 1.13,d) w szczeliny powietrznej jest wynikiem prądu wzbudzenia oraz prądu twornika przy szczotkach umieszczonych w strefie geometrycznie neutralnej.



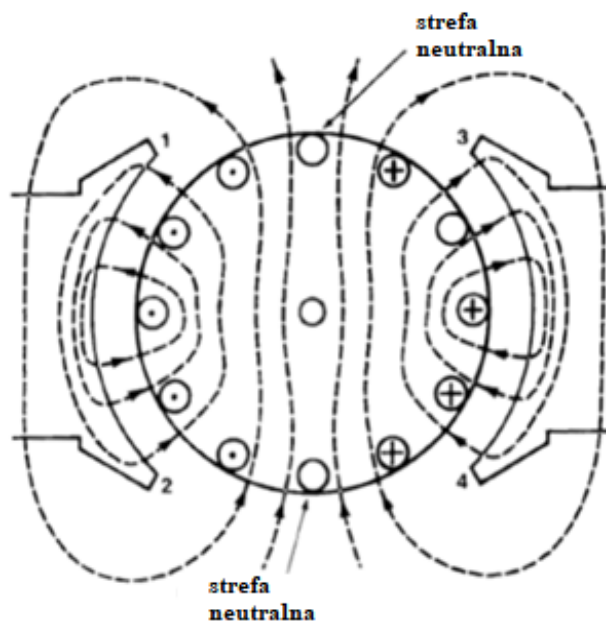
Rys. 1.12. Zależność strumienia magnetycznego od prądu wzbudzenia w maszynie obcowzbudnej prądu stałego



Rys. 1.13. Rozkład pola magnetycznego w maszynie prądu stałego – efekt reakcji twornika [16]

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. Na skutek prądu płynącego przez uzwojenie wirnika zmienia się rozkład wartości indukcji pola magnetycznego, zmniejszając jego wartość pod jedną częścią bieguna i zwiększając pod drugą. Efektem jest zmiana wartości sił elektromotorycznych w prętach, natomiast wypadkowa wartość napięcia indukowanego w tworniku nie zmienia się (rys. 1.15a). 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 wypadkowego strumienia skojarzonego z uzwojeniem twornika (rys. 1.15b).

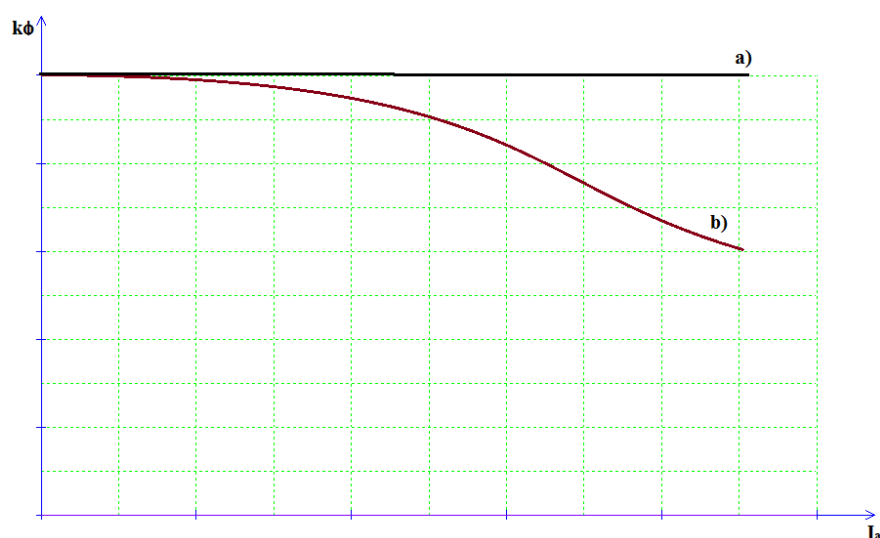
Pole magnetyczne wytworzone przez obwód wzbudzenia jest skierowane pomiędzy biegunami i wyznacza położenie osi podłużnej (osi d). Prąd twornika, przy szczotkach umieszczonych w strefie geometrycznie neutralnej, wytwarza pole skierowane pod kątem prostym do osi d , nazywamy ją osią poprzeczną q i umownie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



Rys. 1.14 Rozkład pola magnetycznego od prądu twornika (reakcja twornika) [16][12]

Wpływ poprzecznej reakcji twornika na wartość strumienia magnetycznego pokazano na rys. 1.15. Efekt zmniejszenia strumienia występuje dopiero od pewnej wartości prądu twornika. Zwykle zauważalny wpływ reakcji twornika występuje od ok. 80% wartości prądu znamionowego i jest zależny od wartości prądu wzbudzenia. Skutkiem reakcji twornika jest

także pojawienie się pola magnetycznego w osi poprzecznej. Ma to istotne znaczenie dla procesu zmiany kierunku prądu w zezwoju komutującym, stąd na rys. 1.13.c i rys. 1.13.d pokazano konieczność zastosowania biegunów komutacyjnych. Uzwojenie biegunów komutacyjnych musi być szeregowo połączone z uzwojeniem twornika i zmniejszać wartość pola magnetycznego reakcji twornika w osi geometrycznie neutralnej (osi q). Opisany wyżej wpływ reakcji twornika na rozkład pola magnetycznego i wartości wypadkowego strumienia przy szczotkach umieszczonych w strefie neutralnej nazywany jest często poprzeczną reakcją twornika.

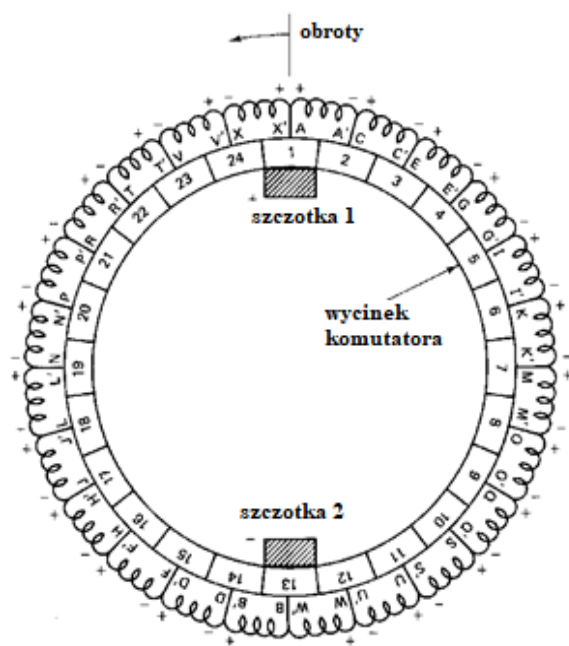


Rys. 1.15. Zależność strumienia magnetycznego w maszynie prądu stałego od prądu twornika: a) pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego, b) wpływ nasycenia fragmentów rdzenia

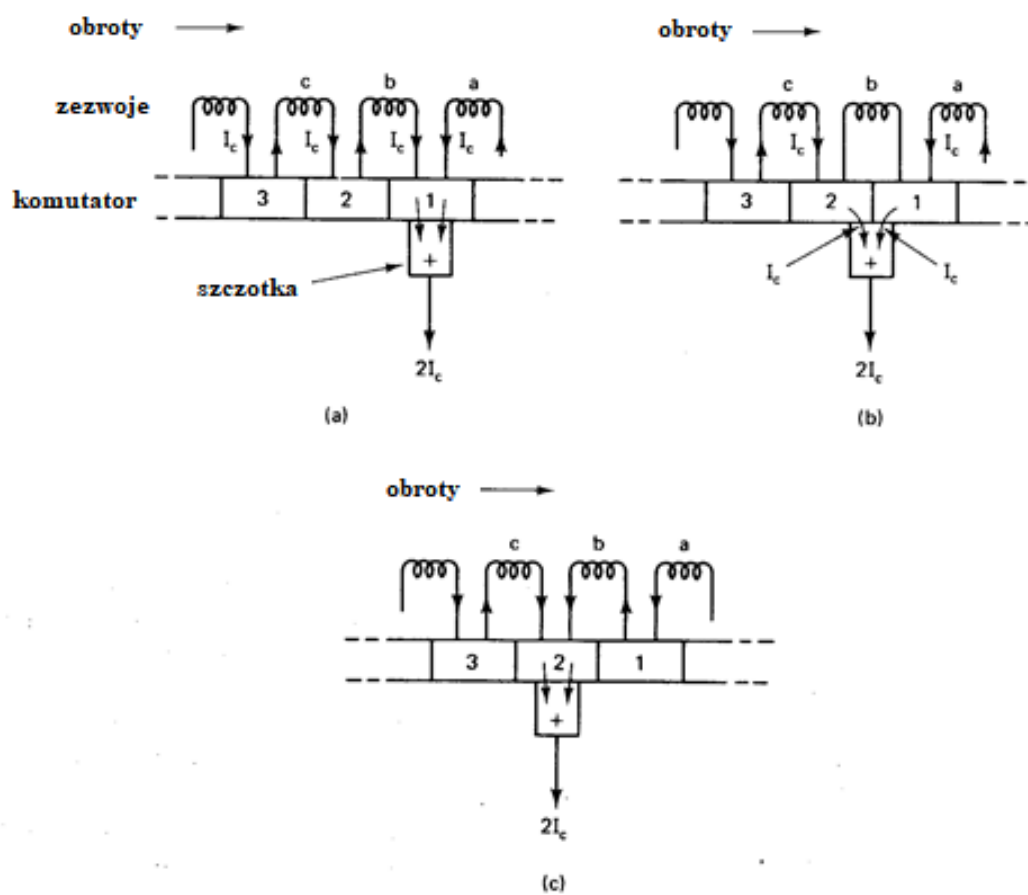
Wysunięcie szczotek ze stery geometrycznie neutralnej powoduje, że przepływ prądu przez uzwojenie twornika wpływa na wartość wypadkowego strumienia magnetycznego w osi podłużnej (stąd czasami zjawisko to nazywane jest podłużną reakcją twornika). Wysunięcie szczotek w kierunku zgodnym z kierunkiem prędkości obrotowej w silniku powoduje wzrost pola magnetycznego proporcjonalnie do wartości prądu twornika. W prądnicy wysunięcie szczotek w kierunku zgodnym z kierunkiem prędkości wirnika powoduje osłabienie wypadkowej wartości strumienia magnetycznego.

1.4. Komutacja

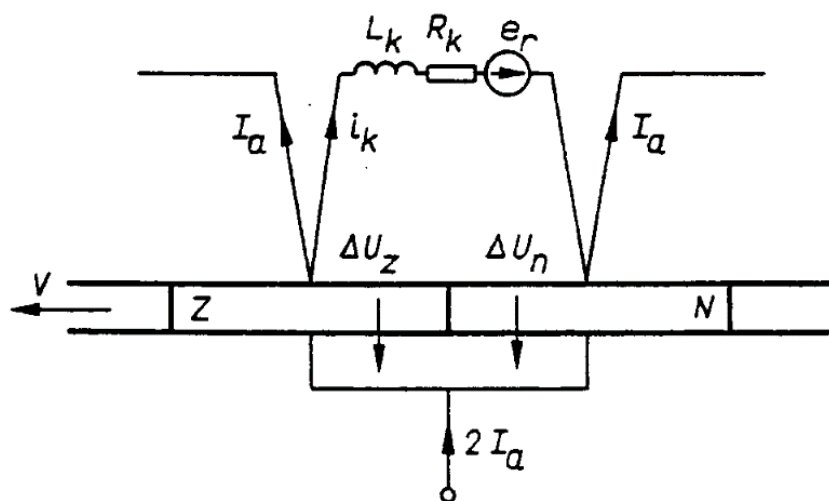
Największe problemy w maszynach prądu stałego związane są z procesem zmiany kierunku prądu w zezwojach które przechodzą pomiędzy biegunami. Nazywamy to procesem komutacji. Rys. 1.16 przedstawia schematycznie sposób połączenia uzwojenia twornika oraz jego połączenie z wycinkami komutatora do nieruchomych szczotek.



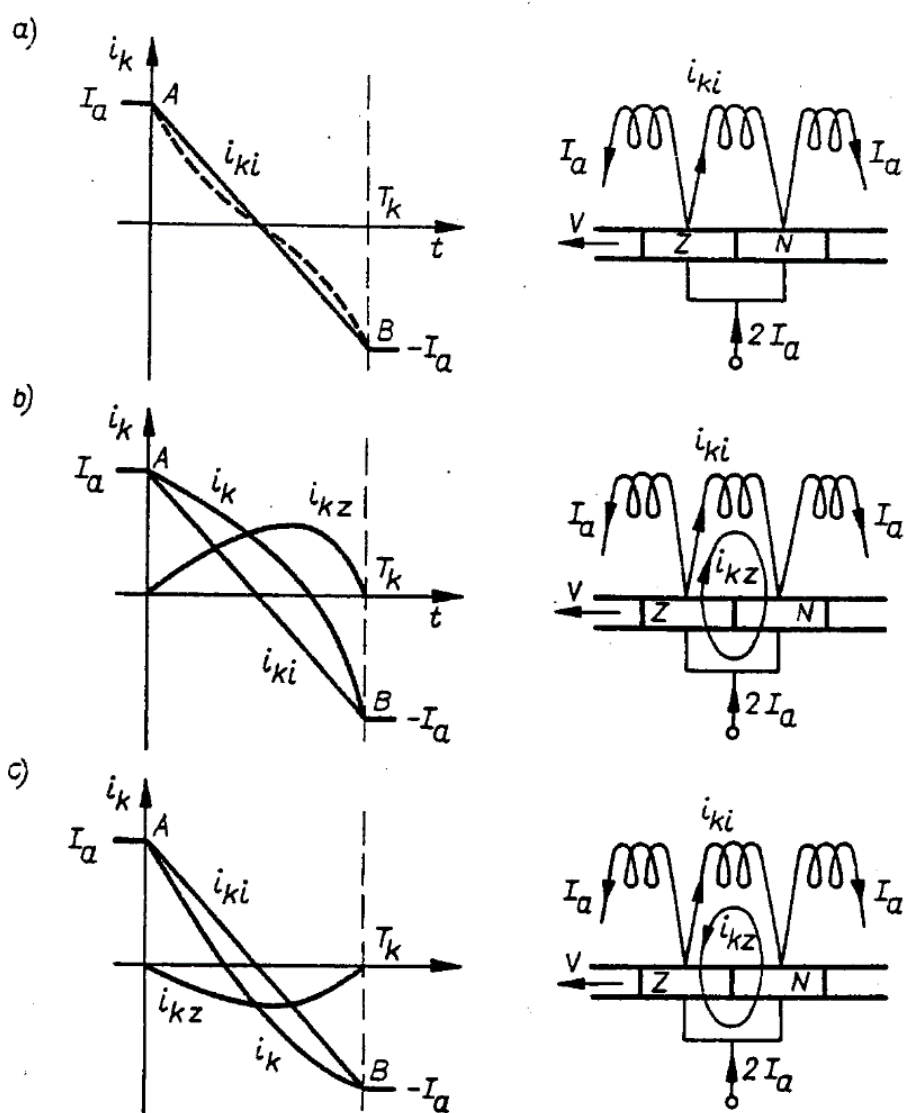
Rys. 1.16. Uzwojenie twornika i jego połączenie z komutatorem [12]



Rys. 1.17. Proces komutacji [12]



Rys. 1.18. Schemat zastępczy zezwoju komutującego [9]



Rys. 1.19. Komutacja prostoliniowa a), opóźniona b) i przyspieszona c) [9]

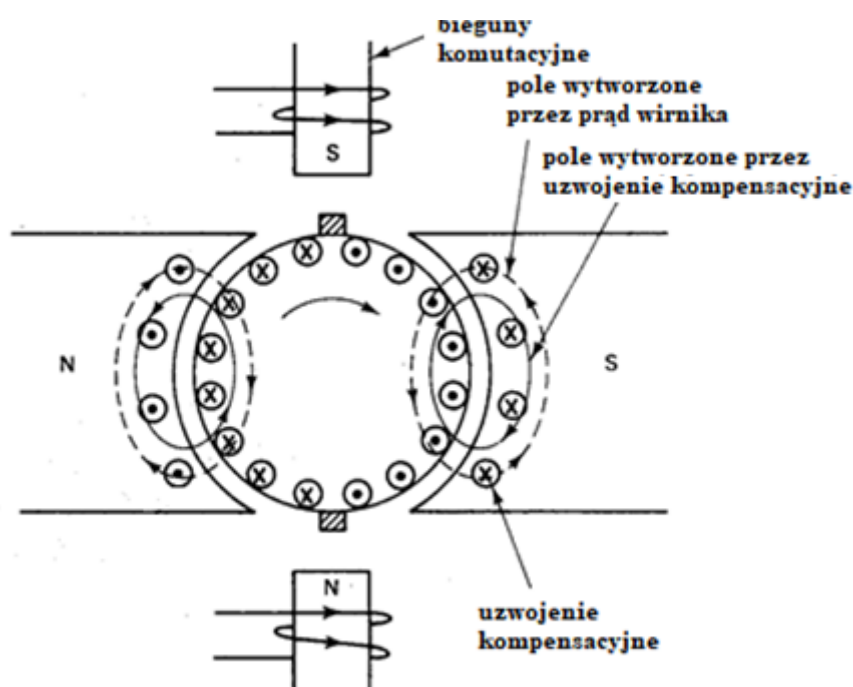
Obrót komutatora powoduje, że prąd płynący przez szczotki do pierwszego wycinka komutatora rozdziela się na dwie gałęzie równoległe (rys. 1.17.a). Ruch komutatora powoduje zwarcie ze sobą sąsiednich wycinków (rys. 1.17.b) wraz z zezwojem komutującym przez szczotkę. Po pewnym czasie całość prądu doprowadzonego do twornika jest przejmowana przez następny wycinek komutatora (rys. 1.17.b), co kończy proces komutacji w zezwoju dołączonym do 1 i 2 wycinka komutatora.

W zezwoju komutującym prąd płynący przed zwarciem wycinków komutatora przez szczotkę był równy I_a (rys. 1.18), a po zakończeniu procesu komutacji równy $-I_a$. W czasie procesu komutacji obwód zwarty można przedstawić w postaci schematu zastępczego (rys. 1.18), w którym występuje spadek napięcia na rezystancji zezwoju R_k , napięcie samoindukcji związane 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 i rotacji mówimy wówczas o komutacji prostoliniowej (rys. 1.19.a). Zaletą takiego sposobu zmiany kierunku prądu w zezwoju jest stałość gęstości prądu na całej szerokości szczotki. W praktyce stan taki nie jest osiągalny, możliwe jest uzyskanie zerowej wartości średniej tych napięć w czasie komutacji. Jeśli wartość napięcia rotacji jest zbyt mała, to proces komutacji jest opóźniony (rys. 1.19.b). 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, gęstość prądu wzrośnie po drugiej stronie szczotki i 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 zanieczyszczeń na komutatorze i siły docisku szczotek do komutatora. Proces komutacji jest na tyle skomplikowany, że w praktyce doświadczalnie dobiera się grubość szczeliny powietrznej pomiędzy wirnikiem i biegunami pomocniczymi poprzez wstawianie przekładek magnetycznych pomiędzy jarzmem stojana i pieńkami biegunów pomocniczych.

Proces komutacji wymusza ograniczenie wartości chwilowej prądu twornika. W typowych rozwiązaniach prąd ten nie powinien być większy od 1,2 prądu znamionowego co wymusza stosowanie specjalnych mechanizmów rozruchowych, ograniczających wartość chwilową prądu w czasie rozruchu. Maszyny prądu stałego o mocach 100 kW i większych mają dodatkowe uzwojenie ułożone w żłobkach w nabiegunnikach biegunów głównych (rys.

1.20.). Ich zastosowanie ma na celu wyrównanie rozkładu pola magnetycznego pod biegunami głównymi i praktyczną niwelację poprzecznej reakcji twornika.

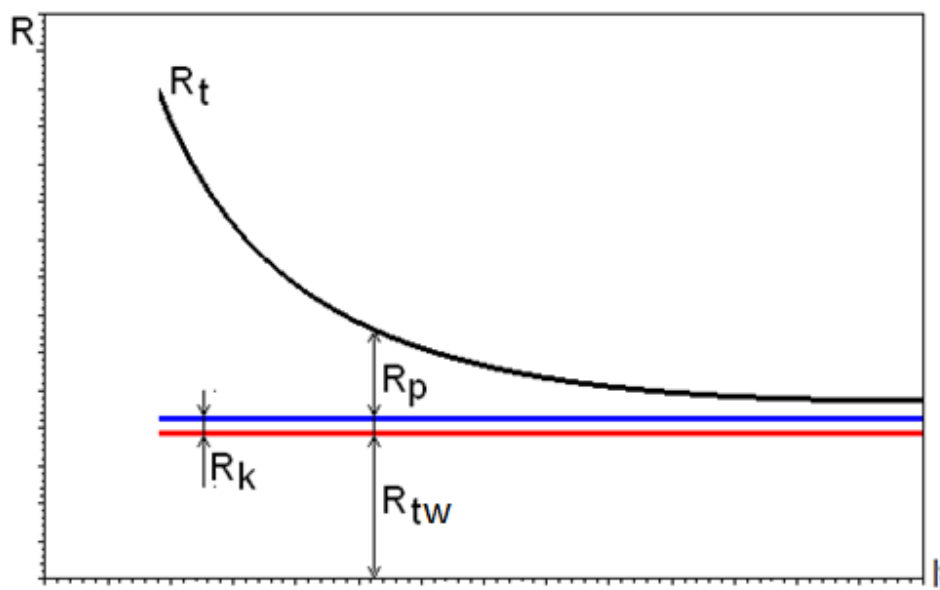


Rys. 1.20. Schemat umieszczenia uzwojeń kompensacyjnych [12]

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. W przypadku pracy silnikowej wysunięcie szczotek w kierunku zgodnym z ruchem wirnika powoduje wzrost wypadkowego strumienia, a w kierunku przeciwnym jego zmniejszenie. Przy pracy prądnicowej jest odwrotnie.

1.5. Rezystancja w obwodzie twornika

Istnienie styku ruchomego pomiędzy szczotkami a komutatorem 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 napięcie przejścia. Jest ono efektem różnej ruchliwości nośników prądu w obu materiałach.



Rys. 1.21. Zależność całkowitej rezystancji w obwodzie twornika od prądu twornika.

W przypadku maszyn elektrycznych napięcie przejścia jest równe około 2V. Przy nieruchomym wirniku wartość napięcia na zaciskach jest zatem równa:

$$U = U_p + R_{tw}I_t + R_k I_t, \quad (1.19)$$

gdzie:

R_{tw} – rezystancja uzwojenia twornika

R_k – rezystancja uzwojenia biegunów komutacyjnych

U_p – napięcie przejścia

Sumę rezystancji w obwodzie twornika R_t maszyny obcowzbudnej można zatem wyznaczyć z zależności (rys. 1.21.):

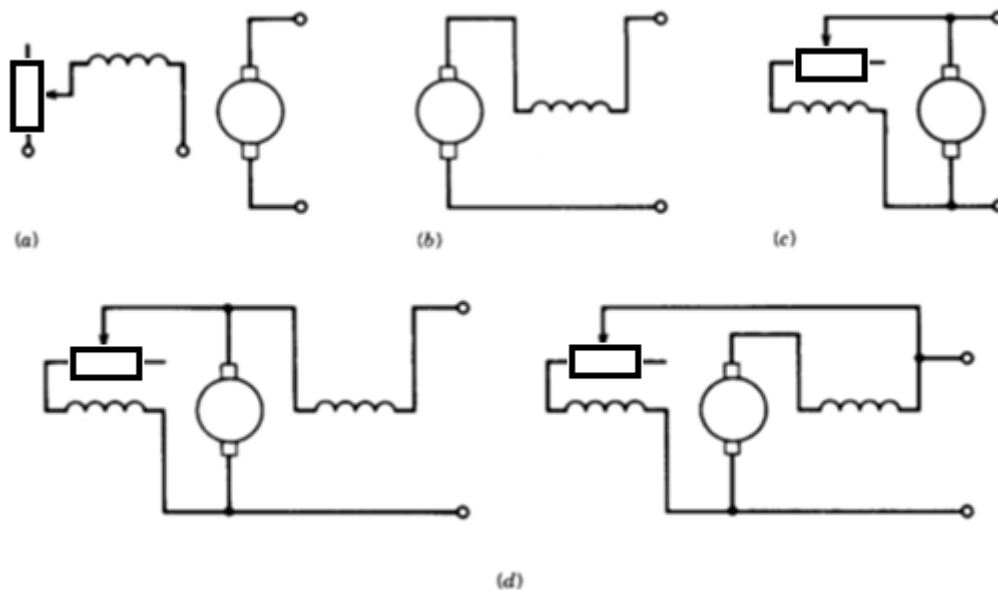
$$R_t = \frac{U_t}{I_t} = R_{tw} + R_k + \frac{U_p}{I_t}, \quad (1.20)$$

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

$$R_p = \frac{U_p}{I_t}. \quad (1.21)$$

1.6. Charakterystyki mechaniczne silników i zewnętrzne generatorów

Dwa uzwojenia w maszynach prądu stałego, twornika i wzbudzenia, mogą być łączone ze sobą w różny sposób (rys. 1.22). W zależności od ich wzajemnego połączenia możliwe jest kształtowanie charakterystyk, uzyskując różne efekty działania.



Rys. 1.22. Różne sposoby połączeń uzwojenia wzbudzenia z obwodem twornika: (a) maszyna obcowzbudna, (b) maszyna szeregową, (c) maszyna bocznikowa, (d) połączenia mieszane (bocznikowo-szeregowe)[12]

Najczęściej stosowaną maszyną prądu stałego (rys. 1.23) jest maszyna obcowzbudna, gdzie obwód wzbudzenia jest zasilany z odrębnego źródła zasilania. Prędkość wirowania wirnika w generatorach jest wymuszona prędkością turbiny i w analizach przyjmujemy, że prędkość ta jest stała. Wartość napięcia na zaciskach twornika jest zależna od napięcia indukowanego (siły elektromotorycznej) oraz wartości rezystancji w obwodzie twornika:

$$U_t = k\phi\omega - R_t I_t. \quad (1.22)$$

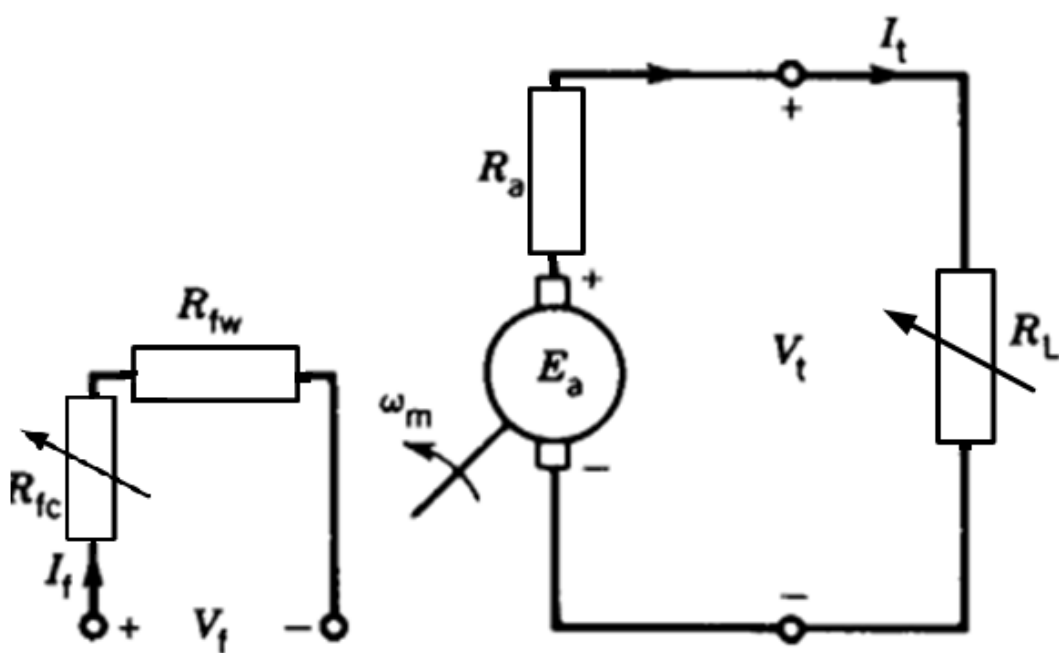
Przyjęcie założenia o stałej prędkości i stałej wartości strumienia powoduje, że zależność pomiędzy napięciem na zaciskach jest liniowo zależna od prądu twornika (rys. 1.24.a). Uwzględnienie poprzecznej reakcji twornika powoduje, że przy większych wartościach prądu następuje zmniejszenie strumienia. Rzeczywisty kształt charakterystyki zewnętrznej pokazano na rys. 1.24.b.

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

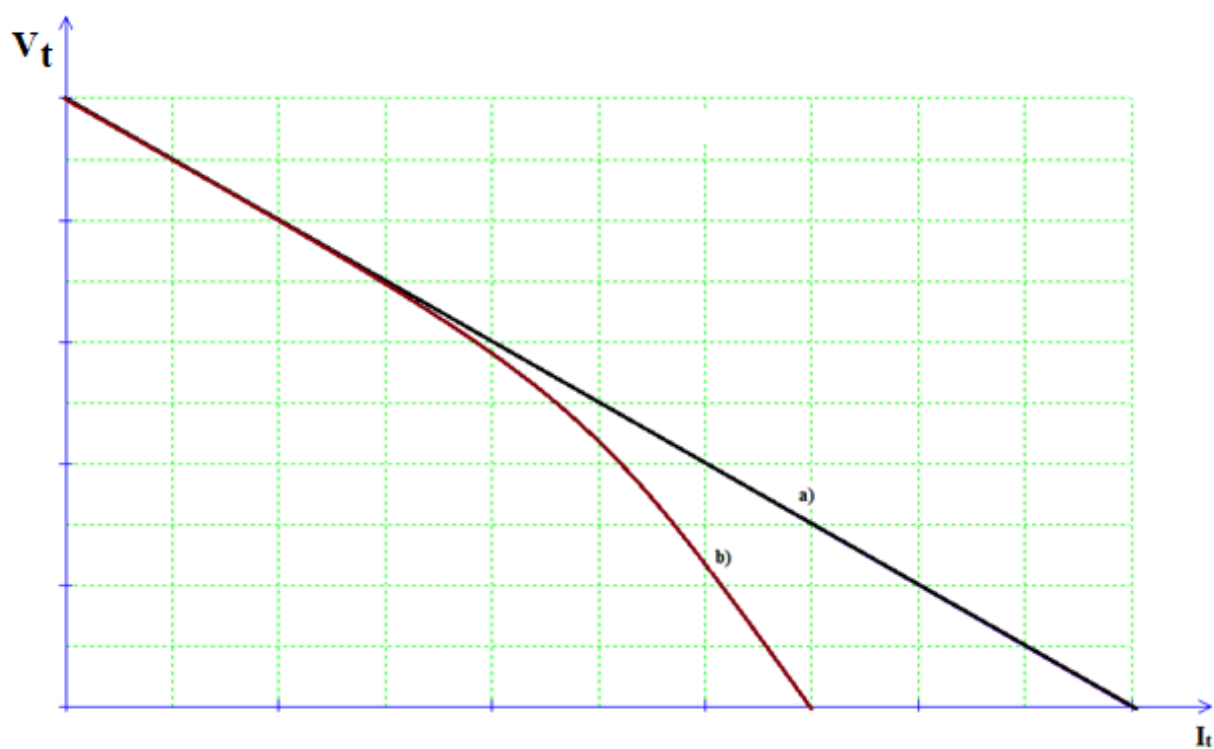
$$U_{t0} = k\phi\omega. \quad (1.23)$$

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

$$I_{tz} = \frac{k\phi\omega}{R_t}. \quad (1.24)$$



Rys. 1.23. Schemat połączeń generatora obcowzbudnego [12]



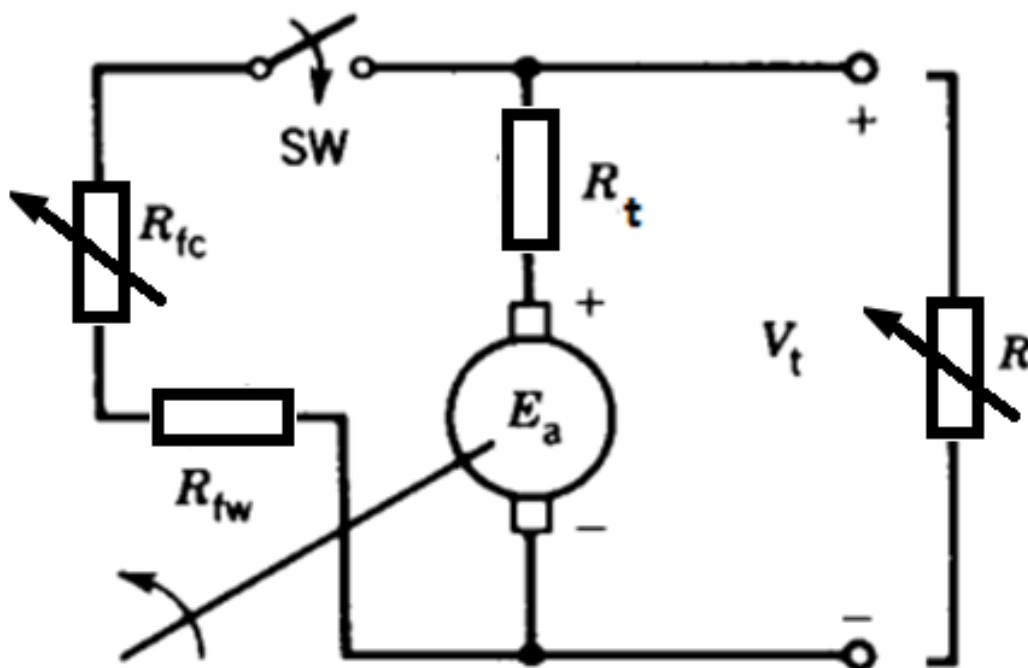
Rys. 1.24. Charakterystyka zewnętrzna generatora obcowzbudnego

Wartość prądu, przy obciążeniu rezystancją o wartości R , można obliczyć według zależności:

$$I_t = \frac{k\phi\omega}{R_t + R}. \quad (1.25)$$

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

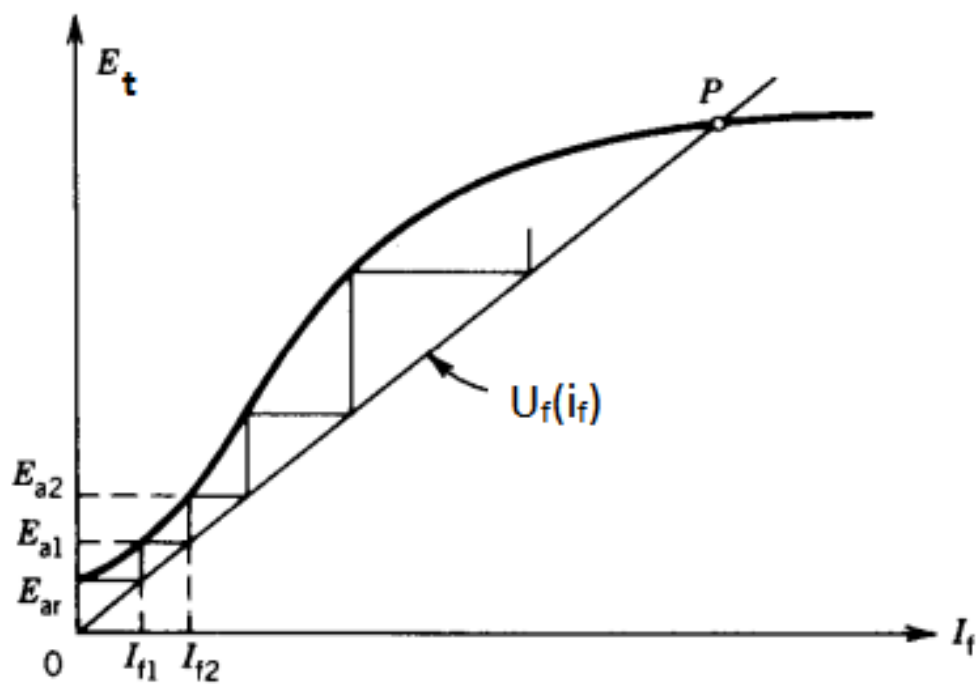
$$M_e = k\phi I_t. \quad (1.26)$$



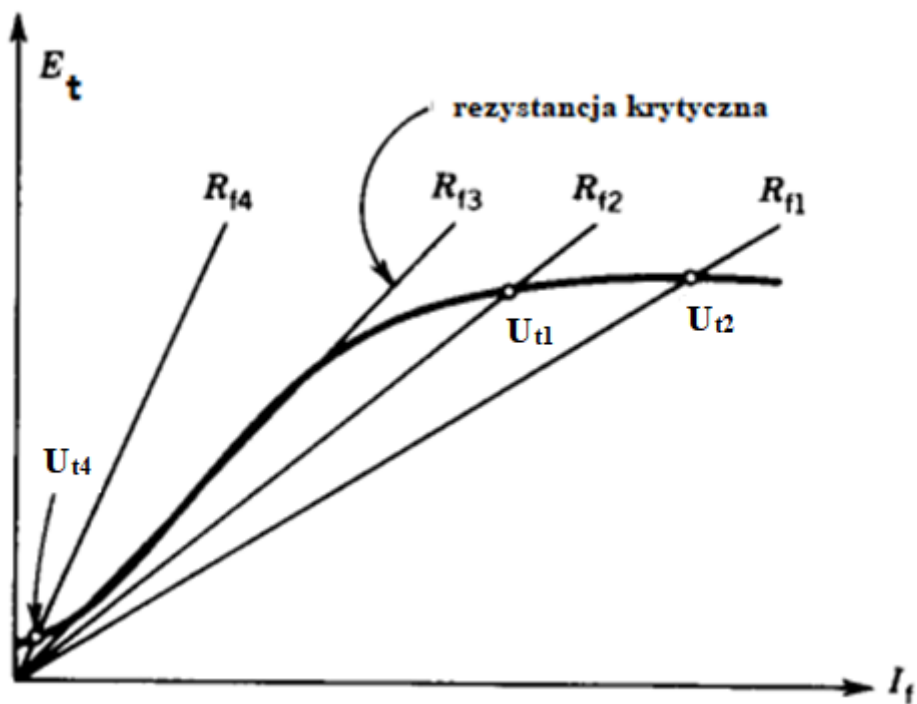
Rys. 1.25. Schemat połączeń generatora bocznikowego [12]

Generator prądu stałego można zbudować, łącząc równolegle (bocznikowo) uzwojenie wzbudzenia i twornika (rys. 1.25). 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. 1.26). Taka wartość siły elektromotorycznej powoduje w stanie ustalonym przepływ prądu ograniczonego sumaryczną rezystancją w obwodzie wzbudzenia i twornika i oraz prądu I_{fl} przez uzwojenie wzbudzenia.

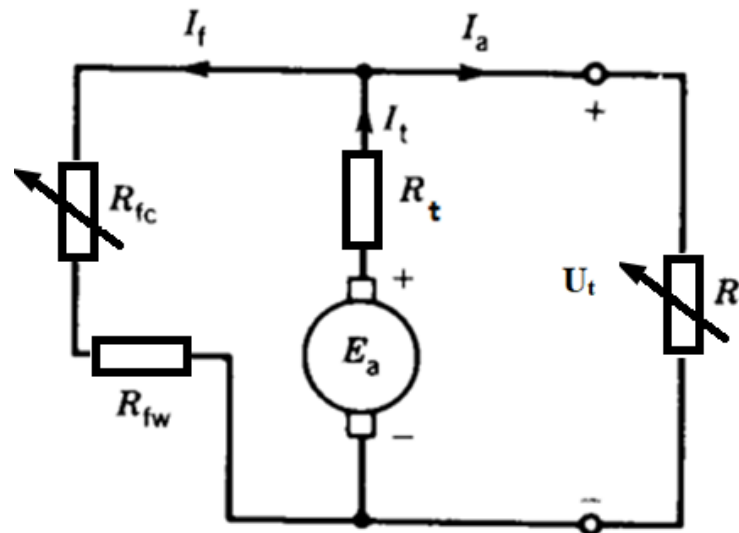
Prąd ten wytworzy siłę magnetyczną, która przy prawidłowym połączeniu uzwojeń spowoduje wzrost strumienia magnetycznego i wzrost siły elektromotorycznej do wartości E_{a1} . Sytuacja taka powtórzy się aż do momentu, gdy wartość siły elektromotorycznej będzie równa spadkowi napięcia na sumarycznej rezystancji obwodu (punkt P na rys. 1.26). Proces samowzbudzenia przebiega poprawnie, gdy wartość rezystancji w obwodzie jest mniejsza od tzw. rezystancji krytycznej (rys. 1.27).



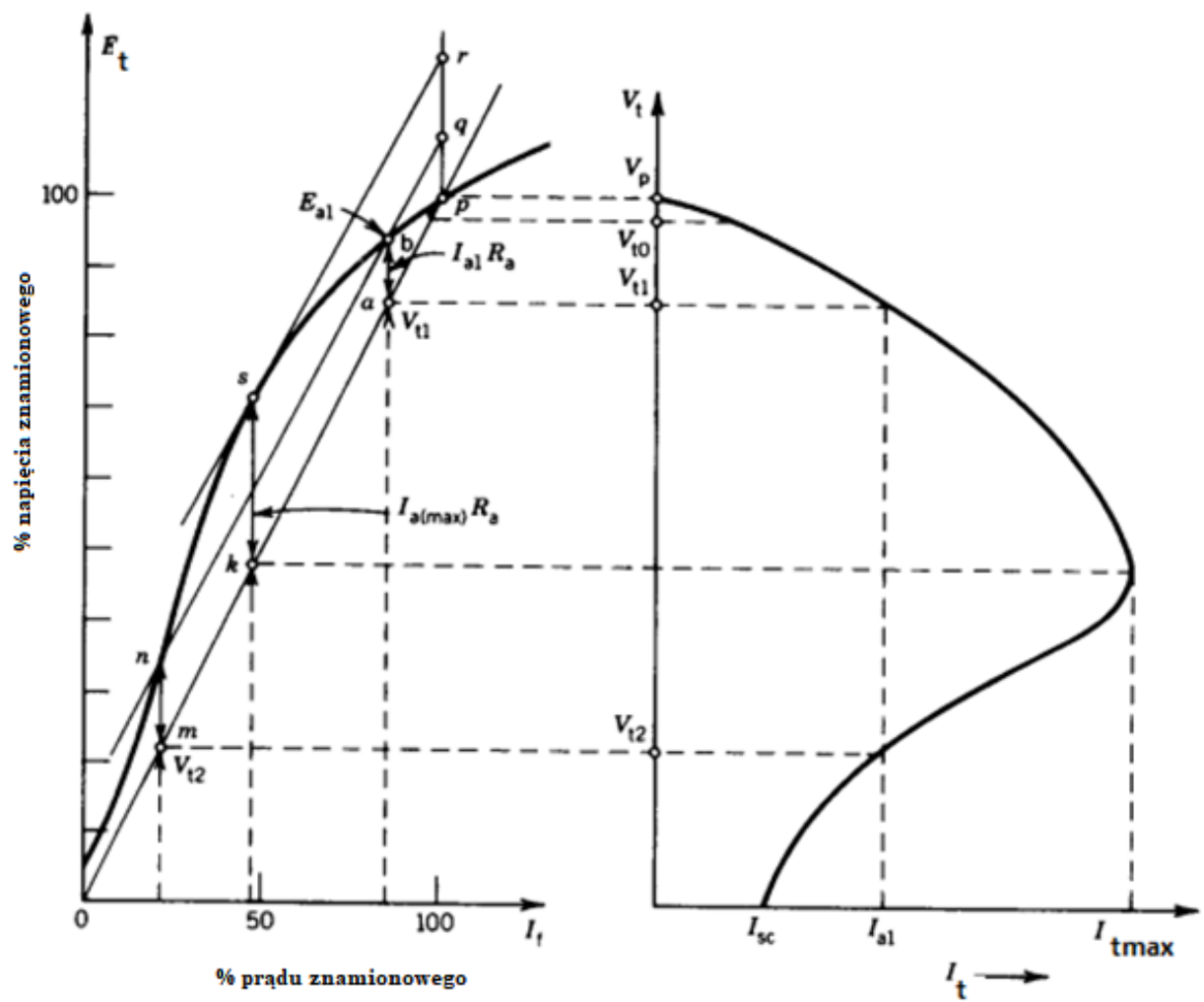
Rys. 1.26. Proces samowzbudzenia w generatorze bocznikowym [12]



Rys. 1.27. Rezystancja krytyczna w generatorze bocznikowym [12]



Rys. 1.28. Obciążenie generatora bocznikowego [12]



Rys. 1.29. Charakterystyka zewnętrzna generatora bocznikowego [12]

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 samowzbudzenia nie nastąpi – maszyna ma tendencję 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, którą nazywamy prędkością krytyczną.

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 skutuje zmianą wartości prądu wzbudzenia oraz zmniejszenie siły elektromotorycznej. W stanie ustalonym pionowy odcinek $I_a R_a$ (rys. 1.29.) reprezentuje spadek napięcia na rezystancji twornika. Odcinek qbn jest równoległy do Op , dlatego $pq=ab=mn=I_a R_a$. Maksymalna wartość prądu obciążenia wystąpi w momencie, gdy pojawi się maksymalne odchylenie przebiegu siły elektromotorycznej od linii prostej Op . Zwarcie zacisków twornika spowoduje także zwarcie uzwojenia wzbudzenia. W takim przypadku o wartości siły elektromotorycznej decyduje strumień remanentu magnetycznego, a prąd zwarcia jest równy:

$$I_{sc} = \frac{k\phi\omega}{R_t}. \quad (1.27)$$

W stanie ustalonym obcowzbudnego silnika prądu stałego (rys. 1.30) moment elektromagnetyczny M_e jest równy momentowi obciążenia M_o , a prąd twornika jest równy:

$$I_t = \frac{M_o}{k\phi}. \quad (1.28)$$

Prędkość wirowania wału wirnika jest związana z wartością napięcia zasilającego oraz spadku napięcia na sumarycznej rezystancji w obwodzie twornika R_t :

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi}. \quad (1.29)$$

Zależność ta opisuje linię prostą pokazaną na rys. 1.31a. Prędkość idealnego biegu jałowego ($M_o=0$), jest zależna od napięcia zasilającego oraz strumienia magnetycznego:

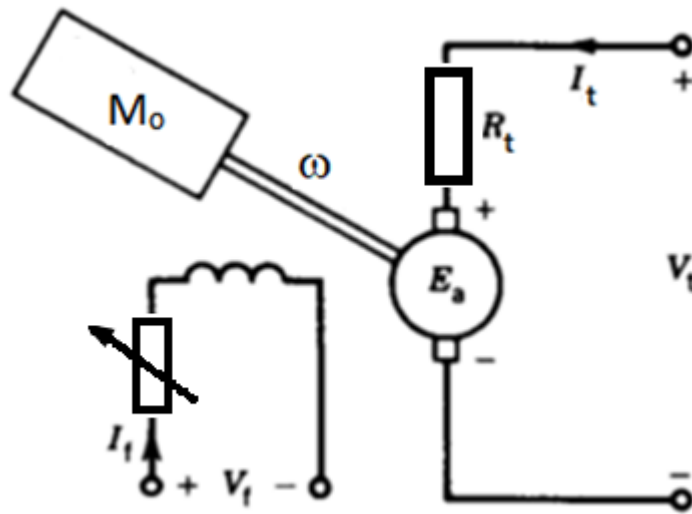
$$\omega_0 = \frac{U_t}{k\phi}. \quad (1.30)$$

Prąd zwarcia występuje przy prędkości równej zero:

$$I_z = \frac{U_t}{R_t}. \quad (1.31)$$

Moment zwarcia jest proporcjonalny do strumienia magnetycznego:

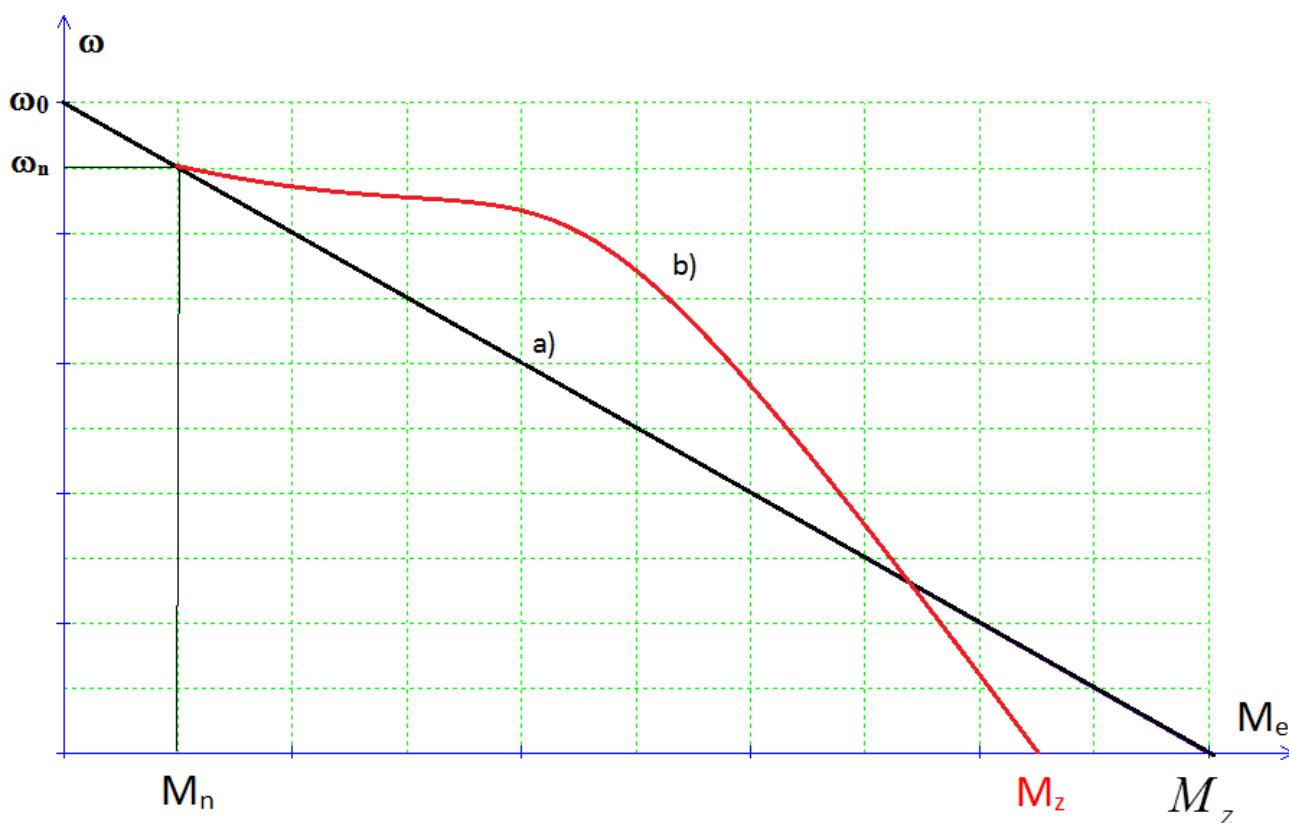
$$M_z = k\phi I_z. \quad (1.32)$$



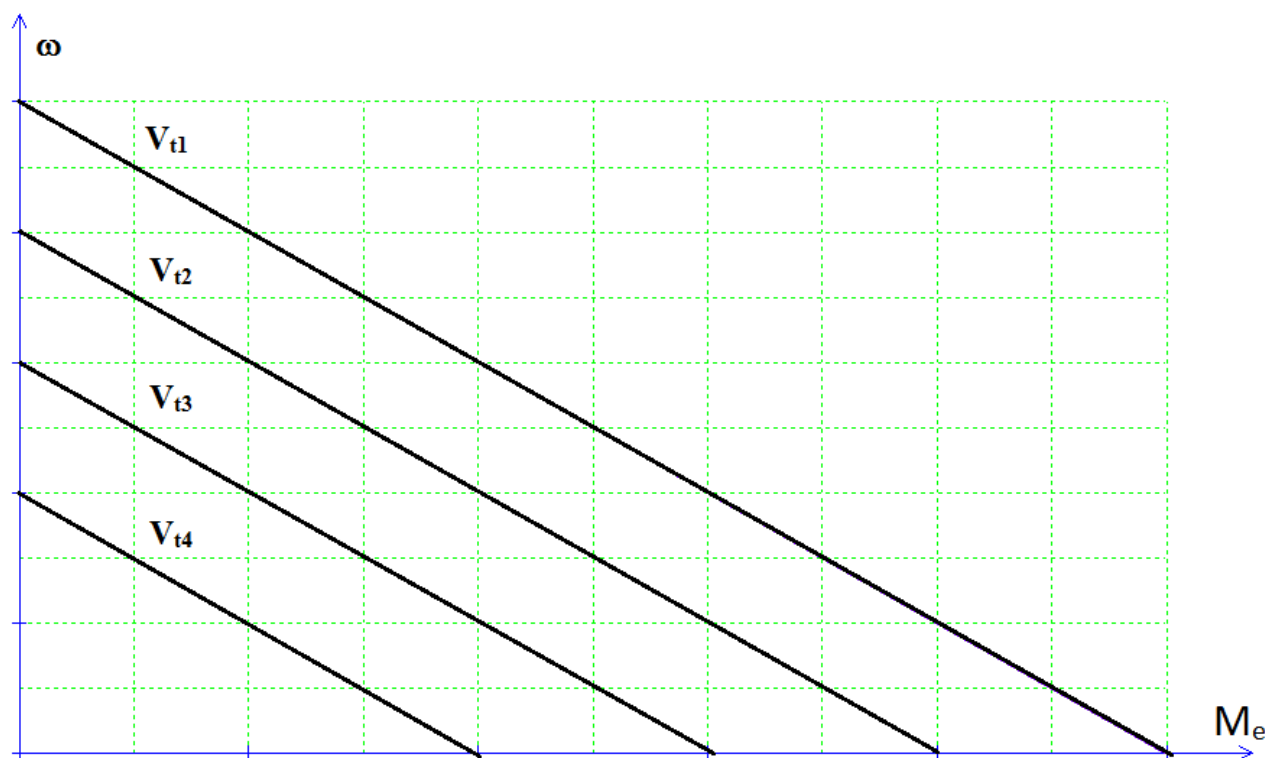
Rys. 1.30. Schemat połączeń silnika obcowzbudnego [12]

W przypadku uwzględnienia zmniejszenia się strumienia na skutek poprzecznej reakcji twornika moment zwarcia jest mniejszy niż w przypadku pominięcia nasycenia obwodu magnetycznego (rys. 1.31b). Kształt charakterystyk mechanicznych maszyny obcowzbudnej prądu stałego jest zależny od napięcia zasilającego (rys. 1.32), sumarycznej rezystancji w obwodzie twornika (rys. 1.33) oraz różnych wartości strumienia magnetycznego (rys. 1.34). Do wytworzenia pola magnetycznego w maszynach prądu stałego nie jest konieczne zastosowanie uzwojenia wzbudzenia, często używa się magnesów trwałych [4].

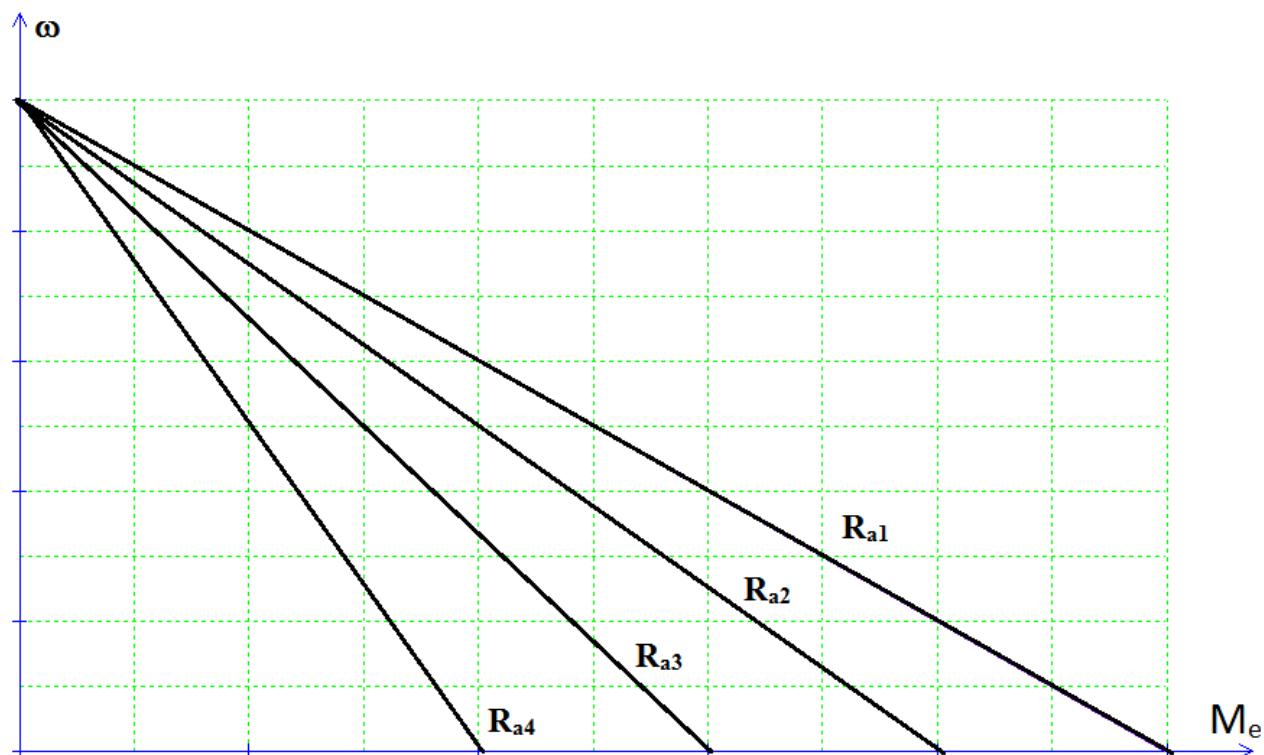
Uzwojenie wzbudzenia może być łączone równolegle do twornika i wówczas silnik taki nazywamy silnikiem bocznikowym. Przy stałej wartości napięcia twornika silnik bocznikowy prądu stałego (rys. 1.35) zachowuje się podobnie do silnika obcowzbudnego. Napięcia na zaciskach twornika jest jednocześnie napięciem wzbudzenia, stąd jego zmiana powoduje proporcjonalną (przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego) zmianę strumienia. Maszyna ta inaczej niż maszyna obcowzbudna reaguje na zmianę napięcia zasilającego. Jednocześnie ze zmianą napięcia na obwodzie twornika zmienia się tu prąd wzbudzenia. Taka zmiana powoduje zmniejszenie strumienia i zwiększenie prądu twornika. W dzisiejszych czasach, z uwagi na dostępność przetworników energoelektronicznych, maszyny takie nie są praktycznie używane.



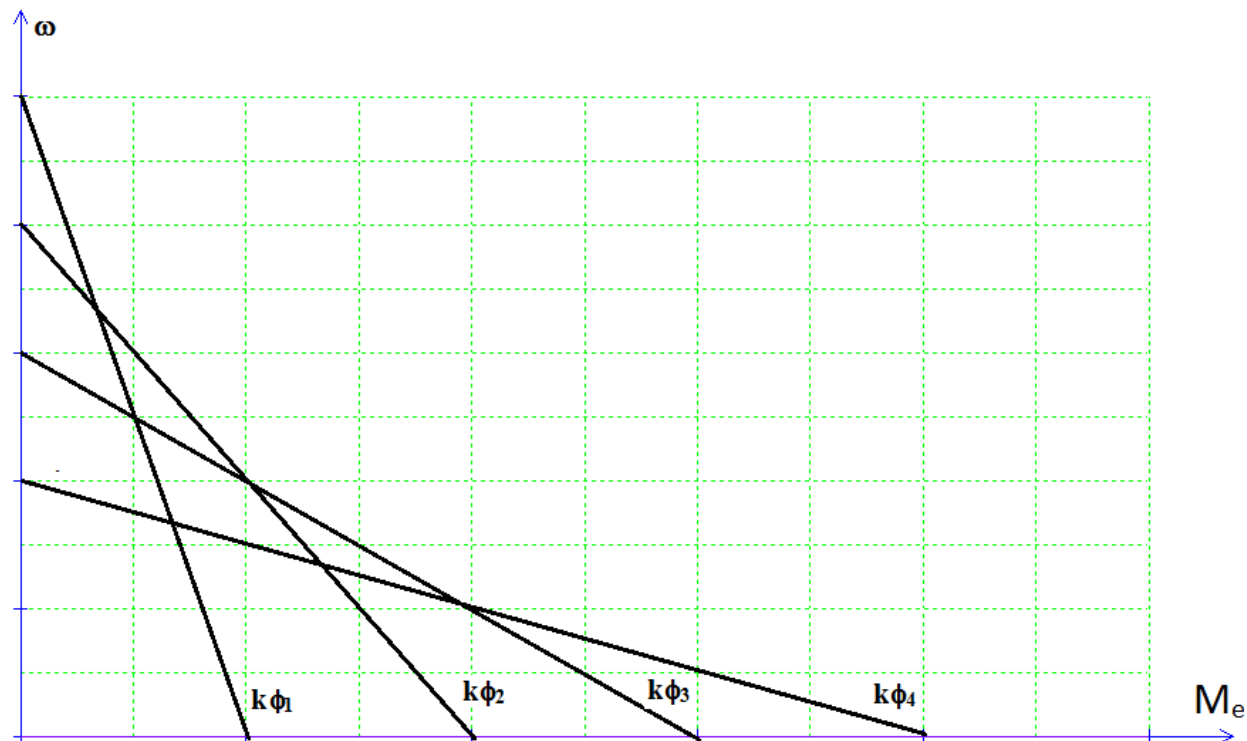
Rys. 1.31. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego: a) obwód magnetyczny liniowy, b) uwzględnienie poprzecznej reakcji twornika.



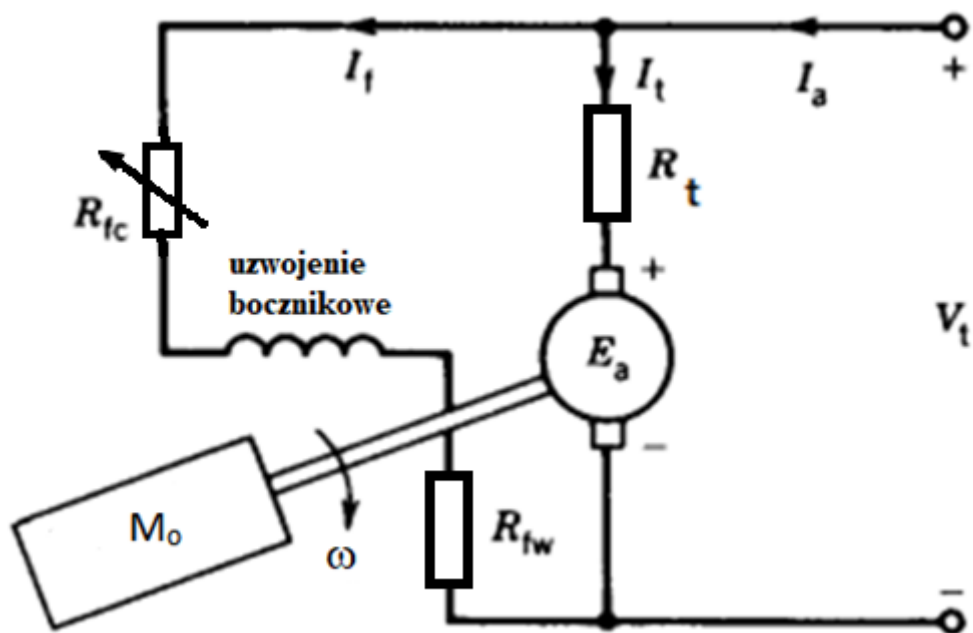
Rys. 1.32. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości napięcia twornika



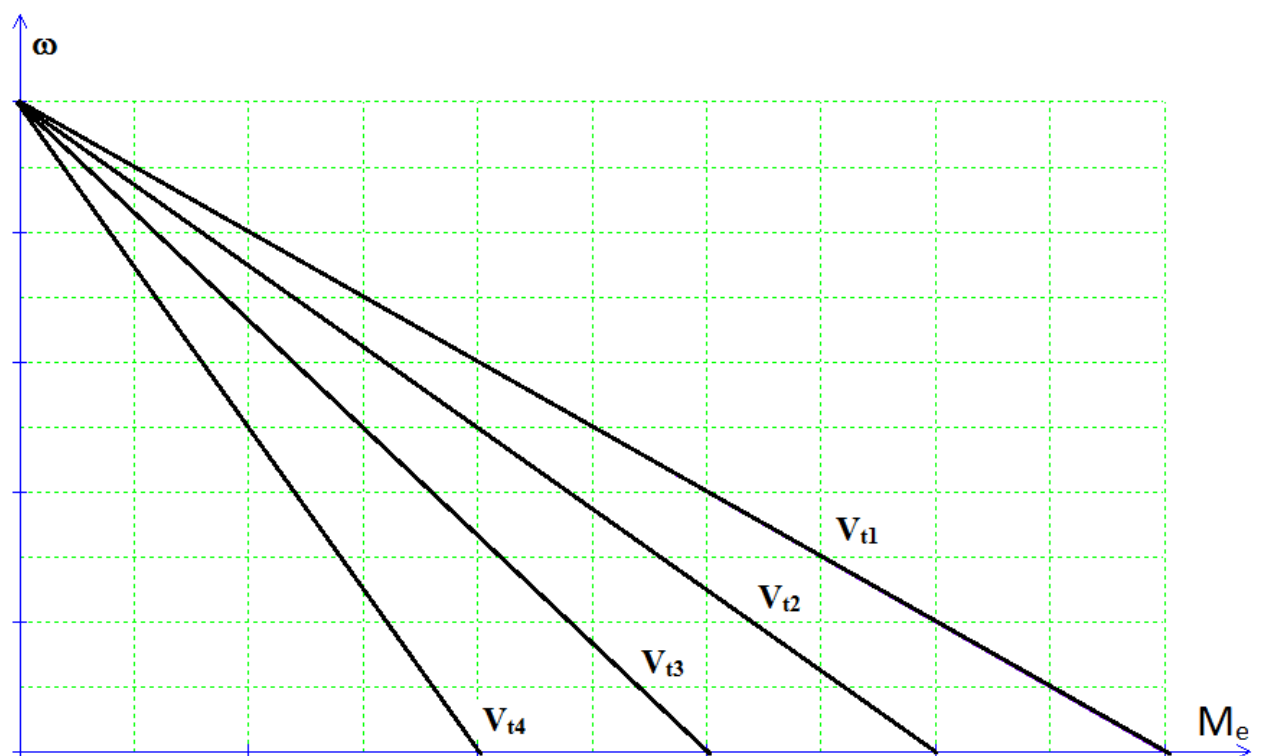
Rys. 1.33. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika



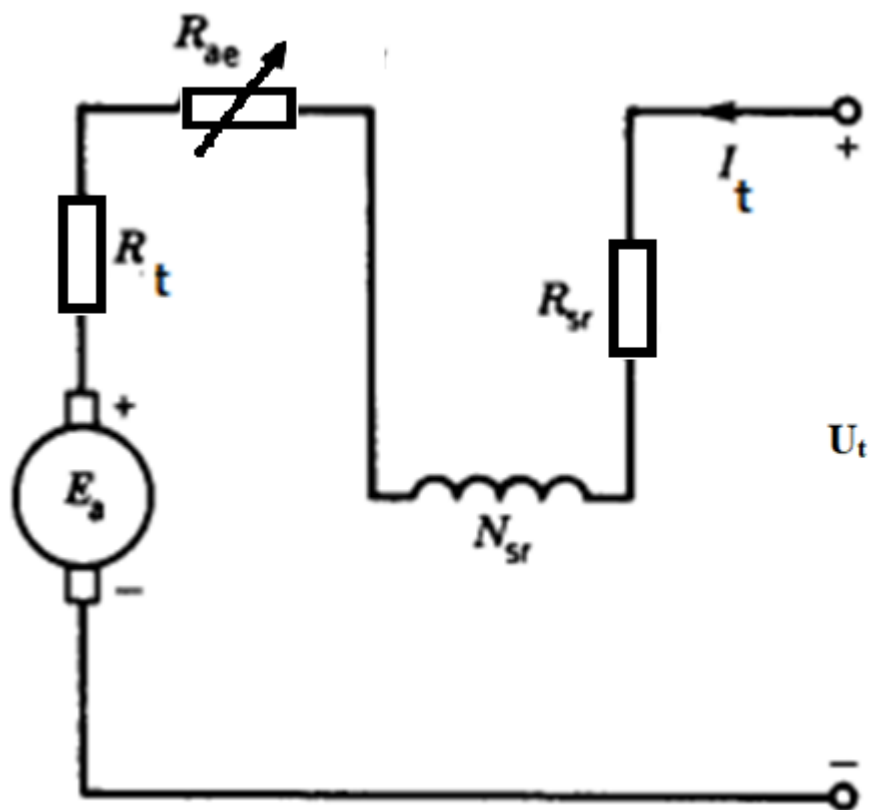
Rys. 1.34. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości prądu wzbudzenia



Rys. 1.35. Schemat połączeń silnika bocznikowego [12]



Rys. 1.36. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego dla różnych wartości napięcia twornika



Rys. 1.37. Schemat połączeń silnika szeregowego[12]



Rys. 1.38. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego dla liniowego obwodu magnetycznego oraz uwzględniającego nasycenie

W silniku szeregowym prądu stałego (rys. 1.37.) wartość prądu wzbudzenia jest jednocześnie prądem twornika. Przy pominięciu nasycenia obwodu magnetycznego wartość strumienia jest tu proporcjonalna do prądu twornika:

$$k\phi = cI_t. \quad (1.33)$$

Moment elektromagnetyczny jest równy:

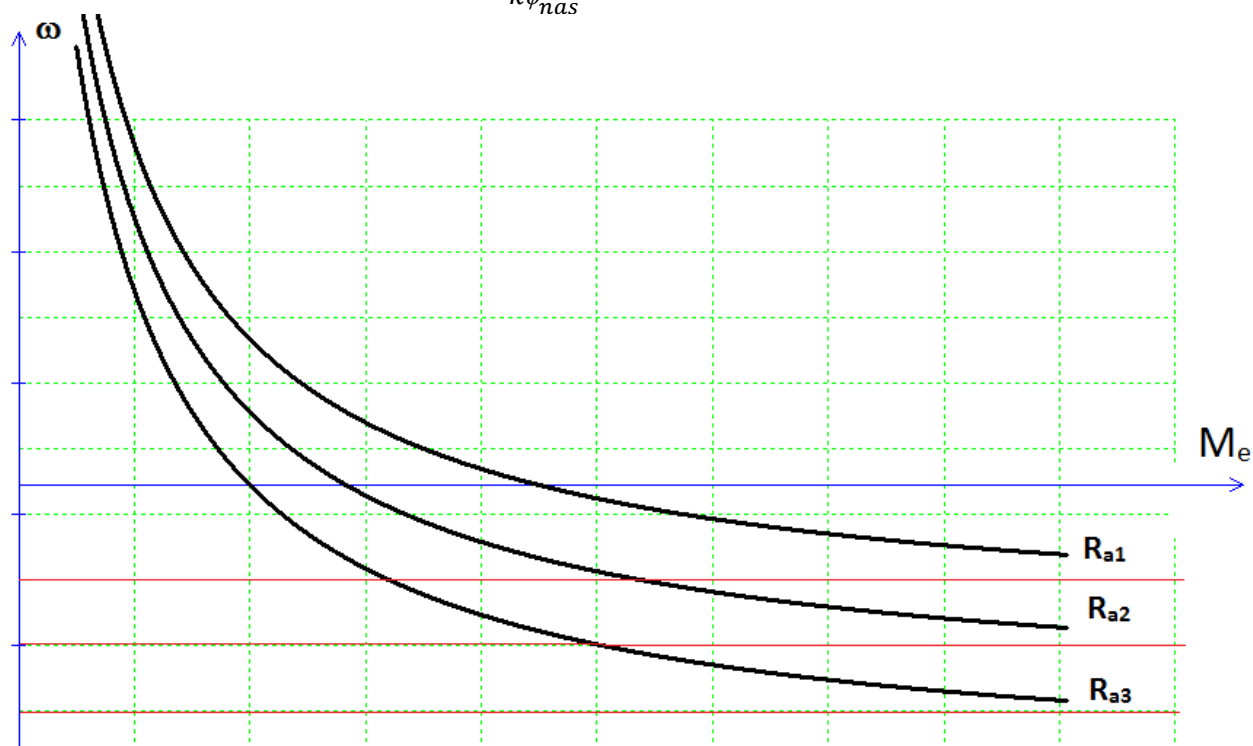
$$M_e = cI_t^2. \quad (1.34)$$

Prędkość wirowania wirnika wyraża się zależnością:

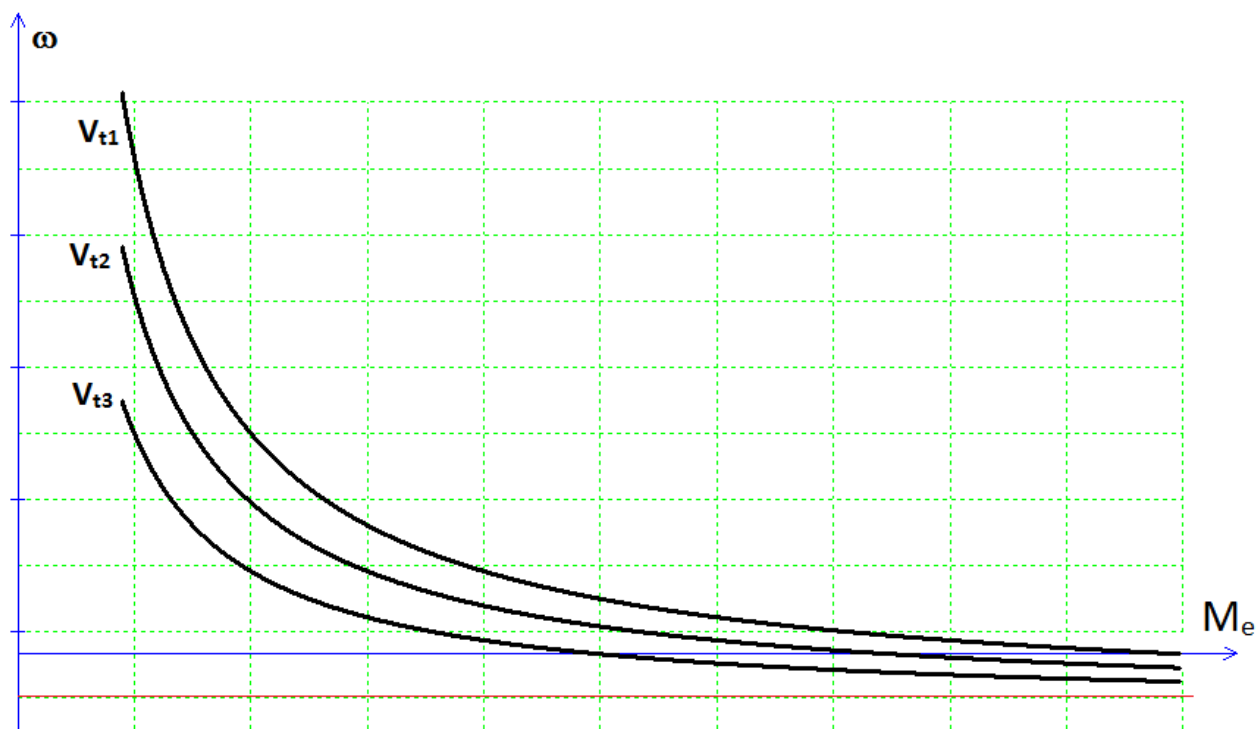
$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{cI_t} = \frac{U_t}{cI_t} - \frac{R_t}{c}. \quad (1.35)$$

Kształt charakterystyk mechanicznych dla różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika pokazano na rys. 1.39, dla różnych napięć zasilających na rys. 1.40. Prąd twornika jest wymuszony przez moment obciążenia, stąd w maszynie szerekowej przy większych wartościach prądu twornika obwód magnetyczny będzie silnie nasycony. Uwzględnienie nasycenia powoduje, że od pewnej wartości prądu twornika strumień jest praktycznie stały ($k\phi_{nas}$) i prędkość wirnika można wyrazić zależnością (rys. 1.38)

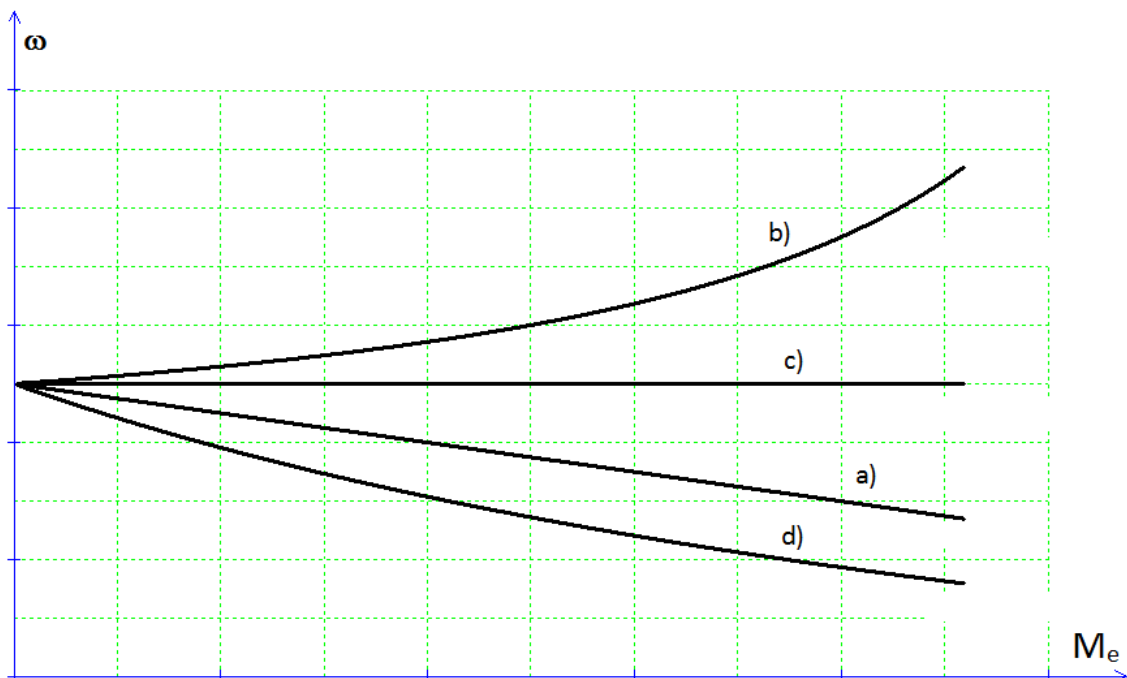
$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi_{nas}}. \quad (1.36)$$



Rys. 1.39. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego przy różnych wartościach rezystancji w obwodzie twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego)



Rys. 1.40. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego przy różnych wartościach napięcia twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego)



Rys. 1.41. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego z dozwojeniem szeregowym

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

$$\omega = \frac{U_t - R_t I_t}{k\phi \pm c I_t}. \quad (1.37)$$

Kształt charakterystyk uzależniony jest od sposobu podłączenia dozwojenia szeregowego względem uzwojenia bocznikowego (obcowzbudnego). Może ono wytwarzać pole magnetyczne w kierunku przeciwnym do pola wytwarzanego przez uzwojenie bocznikowe (obcowzbudne). Rozwiązanie takie stosuje się często w celu „usztynwienia” charakterystyki mechanicznej silnika bocznikowego (rys. 1.41a). Teoretycznie (przy pominięciu nasycenia obwodu magnetycznego) można tak dobrać część pola wytwarzaną przez dozwojenie szeregowo, by ze wzrostem prądu prędkość nie zmieniała się (rys. 1.41c) (pełna kompensacja spadku napięcia na rezystancji twornika). Możliwy jest nawet stan, gdy wraz ze wzrostem obciążenia rośnie prędkość (rys. 1.41b). W praktyce, przy prądzie twornika większym od ok 80% prądu znamionowego, poprzeczna reakcja twornika powoduje zmniejszenie strumienia i niemożliwe jest uzyskanie linii prostej.

Możliwe jest także kształtowanie charakterystyki mechanicznej poprzez stosowanie połączenia wzmacniającego pole wraz ze wzrostem prądu twornika (rys. 1.41d). Taki sposób połączenia uzwojeń powoduje, że ze wzrostem obciążenia prędkość maleje szybciej niż wynika to 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).

1.7. Dynamika maszyn prądu stałego

Równanie Kirchhoffa dla obwodu twornika możemy napisać w postaci:

$$u_t(t) = R_t i_t(t) + k\phi\omega(t) + L_t \frac{di_t(t)}{dt}. \quad (1.38)$$

Równanie dynamiki dla ruchu obrotowego, przy założeniu stałej wartości momentu bezwładności, przyjmuje postać:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M_e(t) - M_o = k\phi i_t(t) - M_o. \quad (1.39)$$

W przypadku, gdy moment obciążenia jest równy zeru, otrzymamy:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = k\phi i_t(t). \quad (1.40)$$

Wartość chwilową prądu można wyrazić zależnością:

$$i_t(t) = \frac{J}{k\phi} \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (1.41)$$

Po wstawieniu równania (42) do (39) otrzymamy:

$$u_t(t) = R_t \frac{J}{k\phi} \frac{d\omega(t)}{dt} + k\phi\omega(t) + L_t \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{k\phi} \frac{d\omega(t)}{dt} \right), \quad (1.42)$$

$$u_t(t) = R_t \frac{J}{k\phi} \frac{d\omega(t)}{dt} + k\phi\omega(t) + L_t \frac{J}{k\phi} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2}. \quad (1.43)$$

Dokonując transformaty Laplace'a (przy założeniu zerowych warunków początkowych), otrzymamy:

$$u_t(s) = R_t \frac{J}{k\phi} s\omega(s) + k\phi\omega(s) + L_t \frac{J}{k\phi} s^2\omega(s). \quad (1.44)$$

Transmitancję silnika obcowzbudnego wyznaczamy z zależności:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{u_t(s)} = \frac{1}{L_t \frac{J}{k\phi} s^2 + R_t \frac{J}{k\phi} s + k\phi}. \quad (1.45)$$

Po przekształceniach:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{u_t(s)} = \frac{1/k\phi}{L_t \frac{J}{k\phi^2} s^2 + R_t \frac{J}{k\phi^2} s + 1}. \quad (1.46)$$

Oznaczmy stałą czasową obwodu twornika (elektromagnetyczna stała czasowa) jako T_e :

$$T_e = \frac{L_t}{R_t}. \quad (1.47)$$

T_M jest elektromechaniczną stałą czasową:

$$T_M = \frac{JR_t}{k\phi^2}. \quad (1.48)$$

Wzmocnienie oznaczmy symbolem K :

$$K = 1/k\phi \quad (1.49)$$

Transmitancję maszyny obcowzbudnej prądu stałego możemy przedstawić w postaci:

$$G(s) = \frac{K}{T_e T_t s^2 + T_M s + 1}. \quad (1.50)$$

Przebieg wartości prędkości kątowej przy skokowej zmianie napięcia zależy od biegunów transmitancji. Wartość biegunów transmitancji ma postać zależną od wartości:

$$\Delta = T_M^2 - 4T_e T_t. \quad (1.51)$$

Jeśli $\Delta \geq 0$ to bieguny mają tylko część rzeczywistą o wartościach:

$$s_{1,2} = \frac{-T_M \pm \sqrt{\Delta}}{2T_e T_t}. \quad (1.52)$$

Przebieg prędkości ma wówczas charakter aperiodyczny, natomiast w przypadku, gdy spełniony jest warunek (1.53) przebieg prędkości ma charakter oscylacyjny tłumiony.

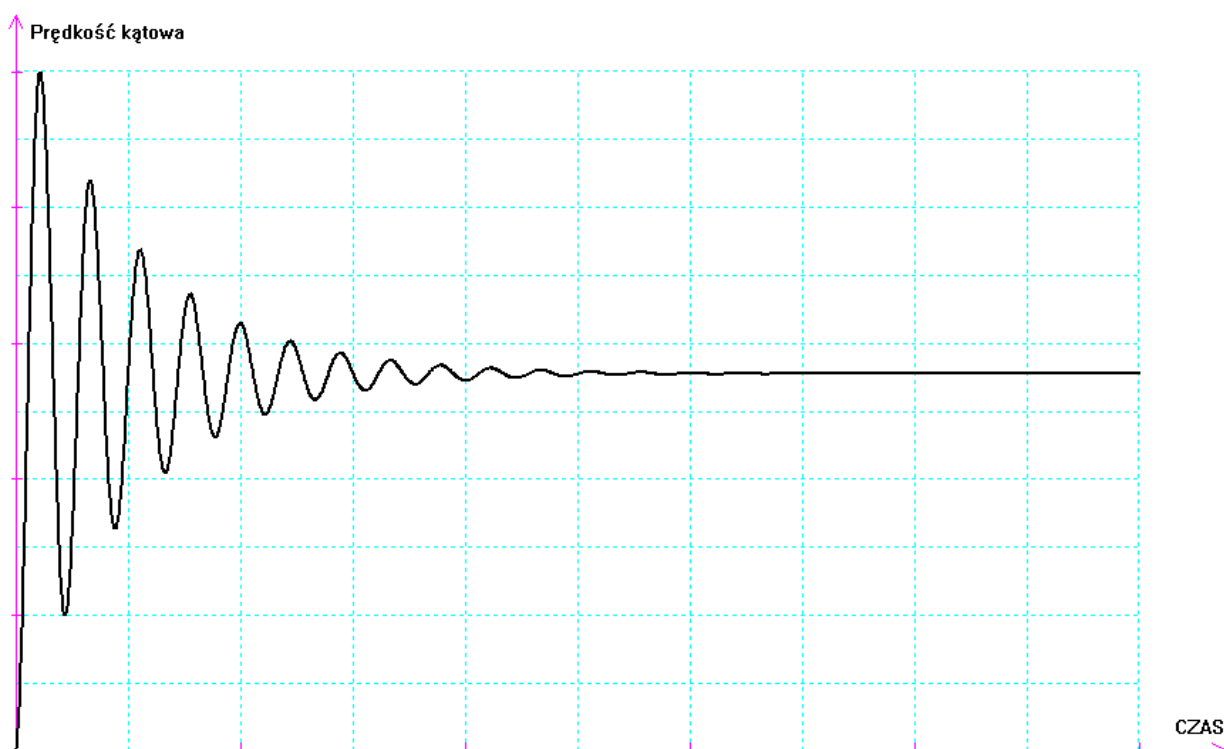
$$\Delta = T_M^2 - 4T_e T_t < 0. \quad (1.53)$$

Przykładowy przebieg prędkości kątowej w czasie rozruchu bezpośredniego maszyny obcowzbudnej, zasilanej ze źródła prądu stałego, pokazano na rys. 1.42. Wartość biegunów można wyznaczyć według zależności:

$$s_{1,2} = \frac{-T_M \pm j\sqrt{|\Delta|}}{2T_e T_M}. \quad (1.54)$$

Oscylacyjny przebieg prędkości kątowej występuje, gdy spełniona jest zależność:

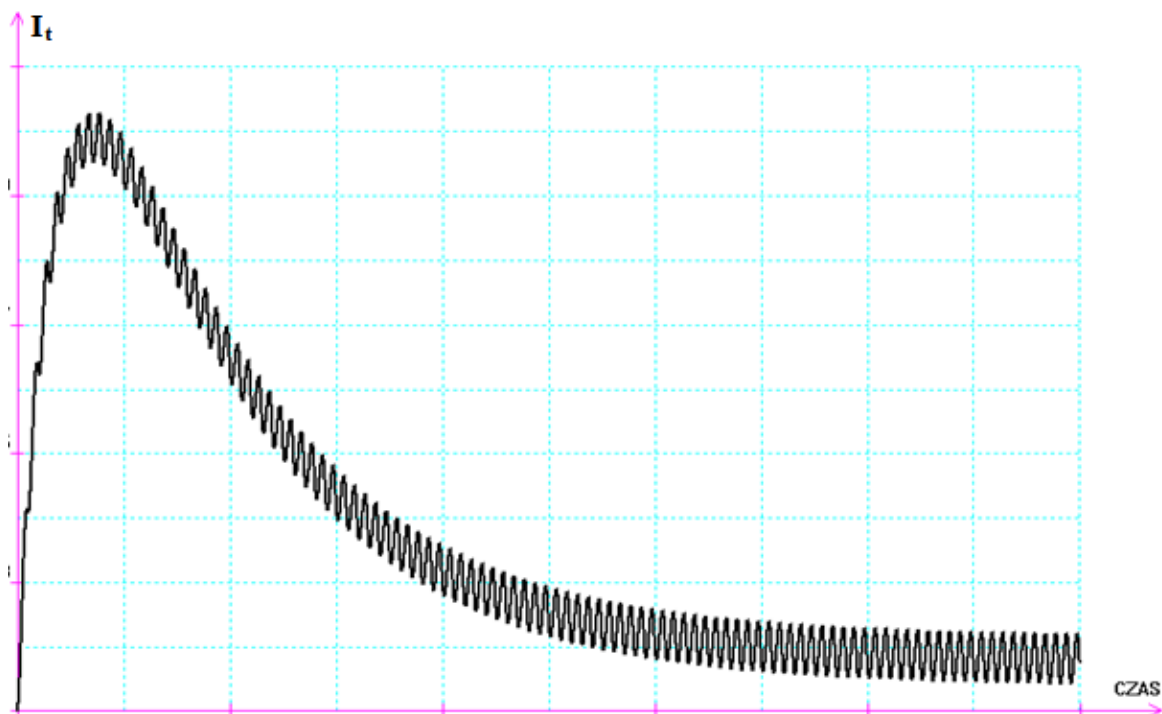
$$T_M < 4T_e. \quad (1.55)$$



Rys. 1.42. Rozruch bezpośredni obcowzbudnego silnika prądu stałego

W zastosowaniach praktycznych maszyny obcowzbudne prądu stałego zasilane są z przekształtników energoelektronicznych. W takim przypadku mogą pojawić się oscylacje w przebiegu wartości prądu, momentu i prędkości obrotowej. Przykładowy przebieg wartości chwilowej prądu twornika w czasie rozruchu bezpośredniego, przy zasilaniu silnika z prostownika dwupołwkowego, pokazano na rys. 1.43.

Równania dynamiki wygodnie jest przedstawić w wielkościach względnych. Jako podstawę analizy przyjmijmy równania obwodu twornika (1.38) i i obwodu wzbudzenia (1.39).



Rys. 1.43. Przebieg prądu twornika w czasie rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z prostownika dwupółówkowego

Jako wielkości odniesienia przyjmijmy następujące wielkości:

- znamionowe napięcie twornika $U_o = U_m$
- znamionowy prąd twornika $I_o = I_m$
- znamionową wartość strumienia $k\phi_o = k\phi_n$

Wielkość odniesienia dla prędkości jest równa prędkości idealnego biegu jałowego dla silnika obcowzbudnego:

$$\omega_o = \frac{U_{tn}}{k\phi_n}. \quad (1.56)$$

Przyjmijmy następujące oznaczenia:

$$u = \frac{u_t}{U_{tn}}, \quad (1.57)$$

$$R_n = \frac{U_{tn}}{I_{tn}}, \quad (1.58)$$

$$r = \frac{R_{td}}{U_{tn}}, \quad (1.59)$$

$$l = \frac{L_t}{R_n}, \quad (1.60)$$

$$\vartheta = \frac{\omega}{\omega_o}, \quad (1.61)$$

$$\varphi = \frac{k\phi}{k\phi_n}. \quad (1.62)$$

Równanie obwodu twornika przyjmie postać:

$$u = ri + l \frac{di}{dt} + \varphi \theta. \quad (1.63)$$

Taka postać równania jest praktyczna, gdyż wszystkie wielkości występujące w równaniach, w zakresie od biegu jałowego do warunków znamionowych, mają wartości z zakresu $0 \div 1$. Parametry występujące w równaniach mają wielkości niemianowane, a porównanie różnych maszyn ze sobą jest łatwiejsze. Równanie obwodu wzbudzenia w wielkościach względnych przyjmuje postać odpowiednio:

$$u_w = r_w i_w + l_w \frac{di_w}{dt}, \quad (1.64)$$

$$R_{wo} = \frac{U_{wn}}{I_{wn}}, \quad (1.65)$$

$$r_w = \frac{R_w}{R_{wo}}, \quad (1.66)$$

$$l_w = \frac{L_w}{L_{wo}}. \quad (1.67)$$

Równanie momentu:

$$m = \varphi i. \quad (1.68)$$

Jednym z podstawowych komplikacji analiz maszyn elektrycznych jest fakt nieliniowej zależności strumienia od prądu magnesującego, stąd dla przybliżonego uwzględnienia nasycenia obwodu magnetycznego można aproksymować charakterystykę magnesowania w wielkościach względnych. Pomijając zjawisko histerezy magnetycznej, można stosować wzór aproksymujący w postaci [15]:

$$\varphi = \frac{i_w}{a|i_w| + (1-a)}. \quad (1.69)$$

Przy czym:

$$a \approx 0,55 \div 0,65. \quad (1.70)$$

Nie jest to jedyne przybliżenie charakterystyki magnesowania. Stosowane są także inne funkcje aproksymujące krzywą magnesowania [15], np.:

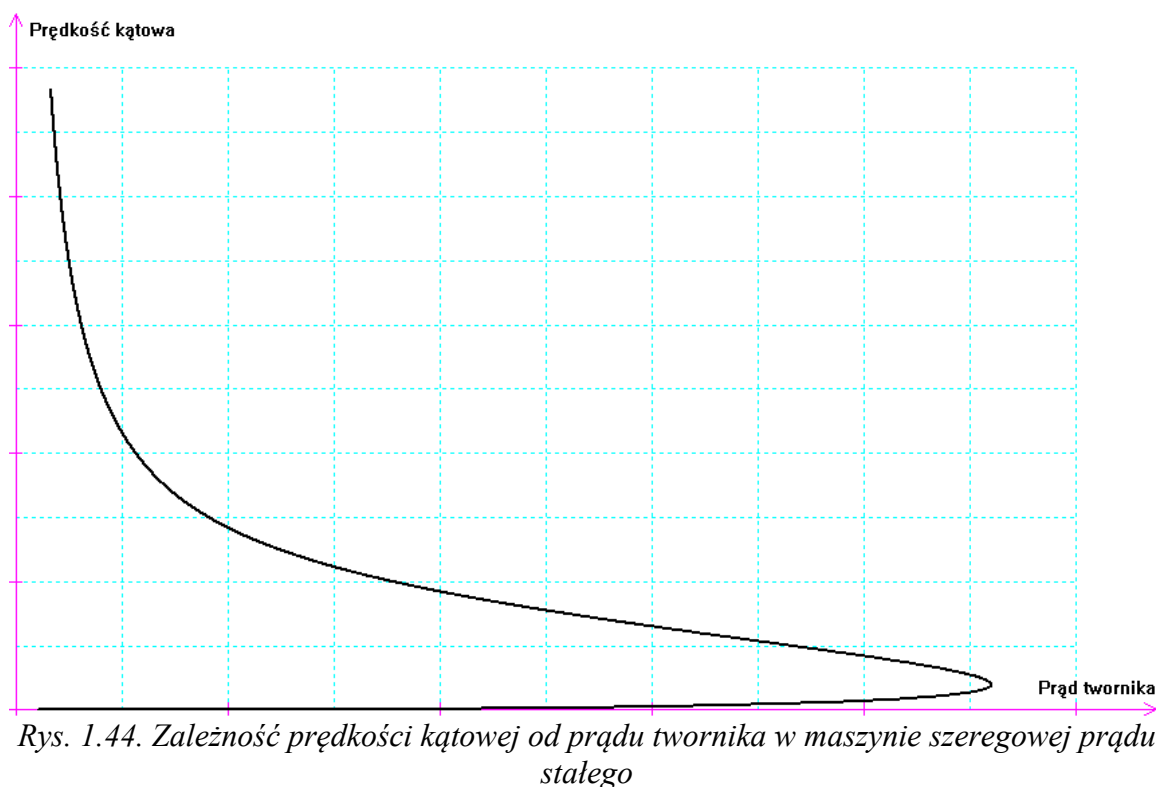
$$\varphi = a_0 \arctan(a_1 i_w) + a_2 i_w. \quad (1.71)$$

Należy przy tym pamiętać, że jest to jedynie przybliżenie zjawisk występujących w rzeczywistej maszynie. Równanie dynamiki dla ruchu obrotowego w wielkościach względnych przyjmuje postać:

$$j_w \frac{d\theta}{dt} = m - m_0, \quad (1.72)$$

gdzie:

$$j_w = \frac{J U_{tn}}{k \varphi_n^2 I_{tn}}. \quad (1.73)$$



Przykładowy przebieg zależności prędkości kątowej od prądu twornika w czasie rozruchu silnika szeregowego prądu stałego, z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego, pokazano na rys. 1.44. W tym przypadku wykorzystano aproksymację charakterystyki magnesowania opisaną równaniem (1.69).

1.8. Silnik uniwersalny

W przypadku szeregowego połączenia uzwojenia wzbudzenia i twornika kierunku wirowania wirnika nie zależy od kierunku napięcia zasilającego. Fakt ten umożliwia zasilanie takiego silnika napięciem sinusoidalnym bezpośrednio z sieci energetycznej. W takiej maszynie pole magnetyczne w stojanie jest polem przemiennym, stąd konieczność blachowania rdzenia stojana. Strumień magnetyczny wytwarzany jest przez prąd magnesujący równy prądowi twornika, stąd przy pominięciu nasycenia obwodu magnetycznego, wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego jest równa:

$$M_e(t) = i_t(t)k\phi(t) = ci_t^2(t). \quad (1.74)$$

W przypadku zasilania napięciem sinusoidalnym wartość chwilową prądu w stanie ustalonym można przedstawić zależnością:

$$i_t(t) = \sqrt{2}I\sin(\omega_1 t - \varphi). \quad (1.75)$$

Stąd moment elektromagnetyczny jest równy:

$$M_e(t) = cI^2\sin^2(\omega_1 t - \varphi). \quad (1.76)$$

Wartość momentu jest zatem zawsze dodatnia i silnik może obracać się tylko w jednym kierunku. Jego wadą są także oscylacje momentu o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości napięcia zasilającego. Zgodnie z równaniem dynamiki (1.77) prędkość kątowna będzie oscylowała wokół wartości średniej z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości napięcia zasilającego.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = cI^2 \sin^2(\omega_1 t - \varphi) - M_o. \quad (1.77)$$

Przyjmując sinusoidalne napięcie zasilające:

$$u_t(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega_1 t). \quad (1.78)$$

Równanie Kirchhoffa przyjmuje postać:

$$\sqrt{2}U \sin(\omega_1 t) = R_t i_t(t) + c i_t(t) \omega(t) + (L_t + L_{szer}) \frac{di_t(t)}{dt}. \quad (1.79)$$

Przy pominięciu oscylacji prędkości kątowej w stanie ustalonym możemy wykorzystać metodę symboliczną analizy obwodów prądu przemiennego i napisać równanie Kirchhoffa jako:

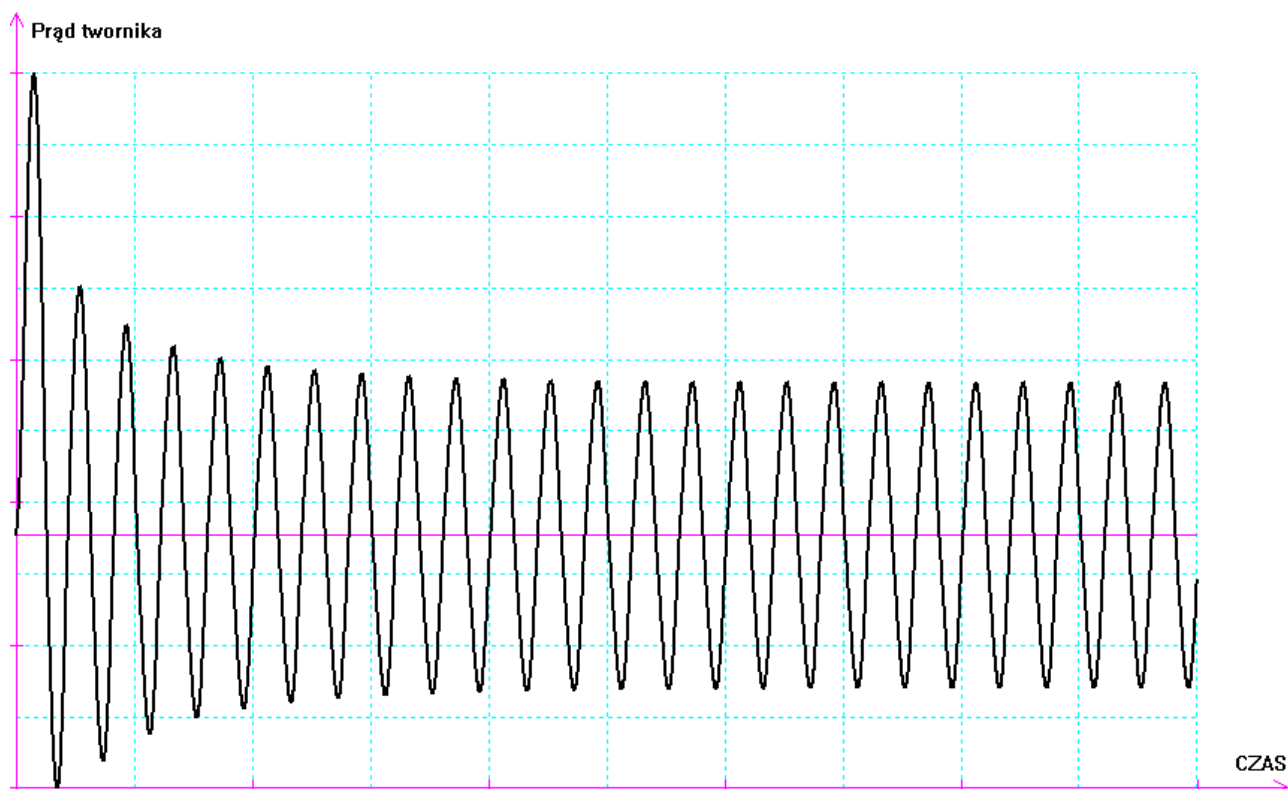
$$\underline{U} = R_t \underline{I} + c \underline{I} \omega + j(X_t + X_{szer}) \underline{I}. \quad (1.80)$$

Wartość średnia prędkości kątowej jest zatem równa:

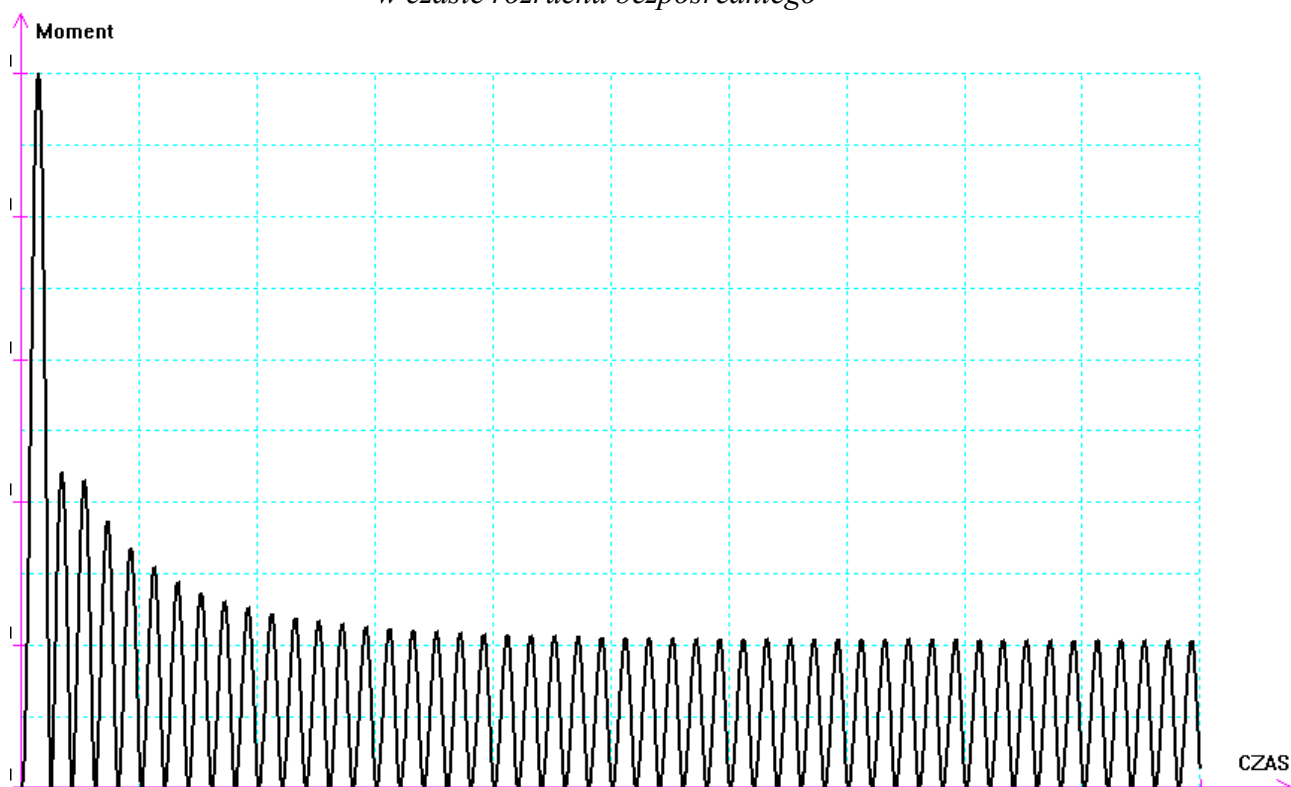
$$\omega = \frac{\underline{U} - [R_t + j(X_t + X_{szer})] \underline{I}}{c \underline{I}} = \frac{\underline{U} - \underline{Z}_t \underline{I}}{c \underline{I}}. \quad (1.81)$$

Silniki uniwersalne są wykorzystywane tam, gdzie chcemy uzyskać duże wartości prędkości kątowej przy zasilaniu bezpośrednio jednofazowej z sieci energetycznej i, podobnie jak w maszynie szeregowej prądu stałego, niedopuszczalna jest praca takiego silnika bez momentu obciążenia. Teoretycznie bowiem prędkość obrotowa przy zerowej wartości momentu będzie dążyła do nieskończoności, stąd silniki takie pracują zwykle jako napędy odkurzaczy i wentylatorów małej mocy. Z uwagi na bardzo skomplikowany proces komutacji maszyny takie nie posiadają biegunów komutacyjnych. Napięcie transformacji indukowane w zwojach komutujących częściowo kompensują napięcie rotacji i samoindukcji.

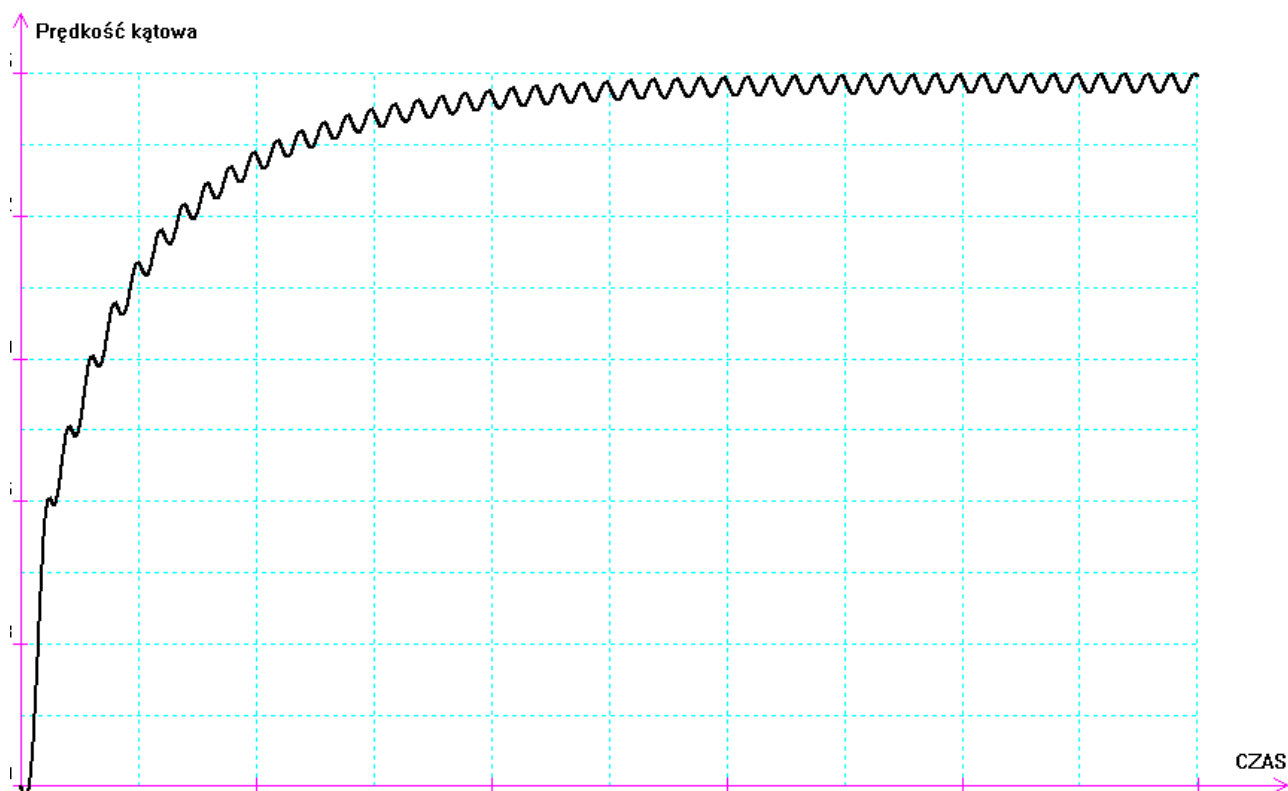
Na kolejnych rysunkach pokazano przykładowe przebiegi wartości chwilowych prądu twornika (rys. 1.45), momentu elektromagnetycznego (rys. 1.46) oraz prędkości obrotowej (rys. 1.47) silnika uniwersalnego obciążonego momentem znamionowym.



Rys. 1.45. Przykładowy przebieg wartości chwilowej prądu w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego



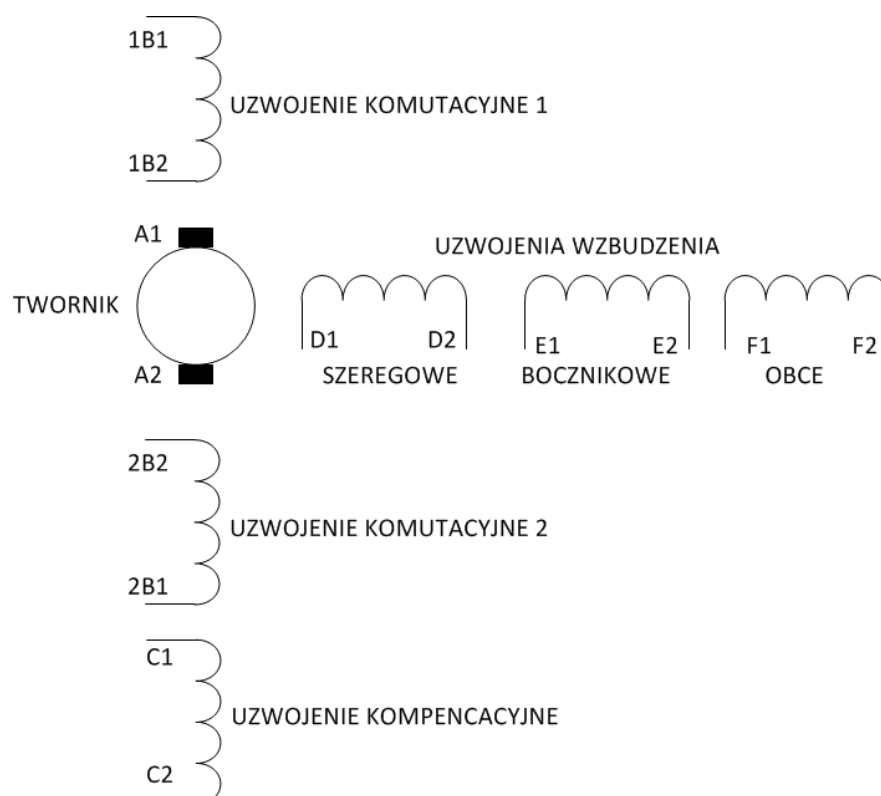
Rys. 1.46. Przykładowy przebieg wartości chwilowej momentu w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego



Rys. 1.47. Przykładowy przebieg wartości chwilowej prędkości kątowej w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego

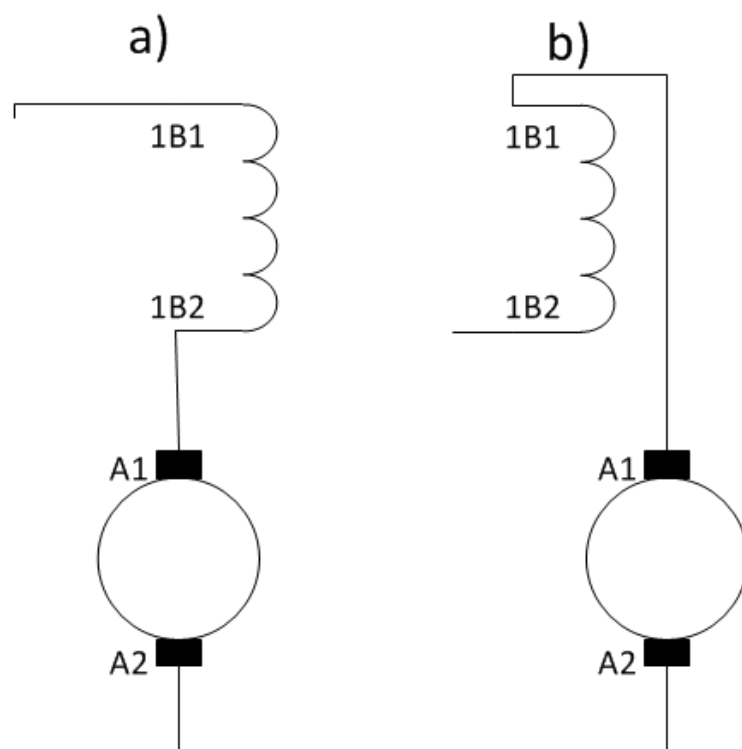
1.9. Badania laboratoryjne maszyn prądu stałego

W maszynach prądu stałego może występować wiele uzwojeń (rys. 1.48). 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). 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 wzbudzenia obce różni się od pozostałych parametrami znamionowymi i zwykle pojawia się tam, gdzie napięcie znamionowe twornika jest różne od napięcia wzbudzenia. Uzwojenie wzbudzenia bocznikowe zwykle jest łączone równolegle do napięcia zasilającego twornik, może być także traktowane jako obce przy zasilaniu ze źródła napięcia różnego niż napięcie twornika. Szeregowe uzwojenie wzbudzenia często występuje łącznie z bocznikowym i wykorzystywane jest zwykle, razem z bocznikowym (lub obcym), do kształtowania charakterystyk zewnętrznych prądnic lub mechanicznych przy pracy silnikowej.

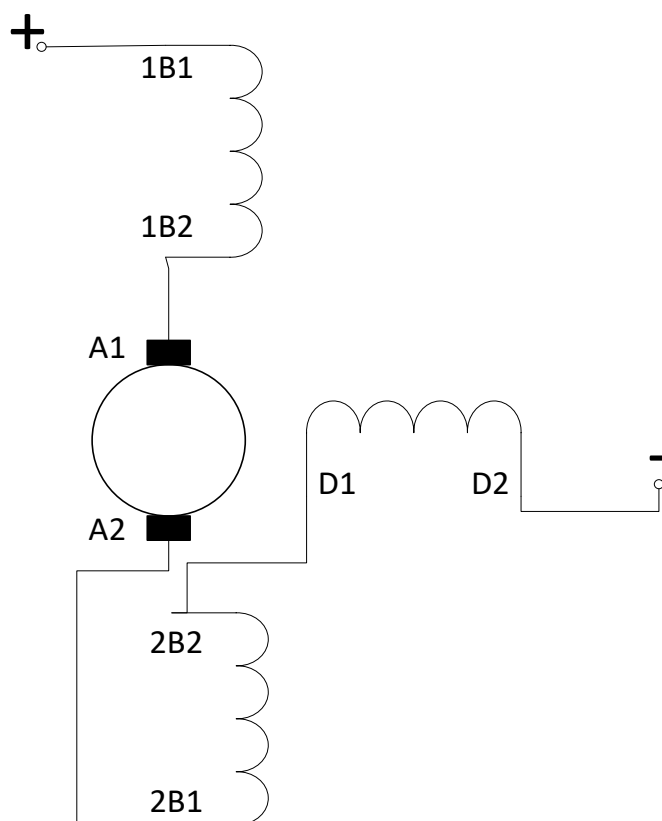


Rys. 1.48. Oznaczenie uzwojeń w maszynach prądu stałego

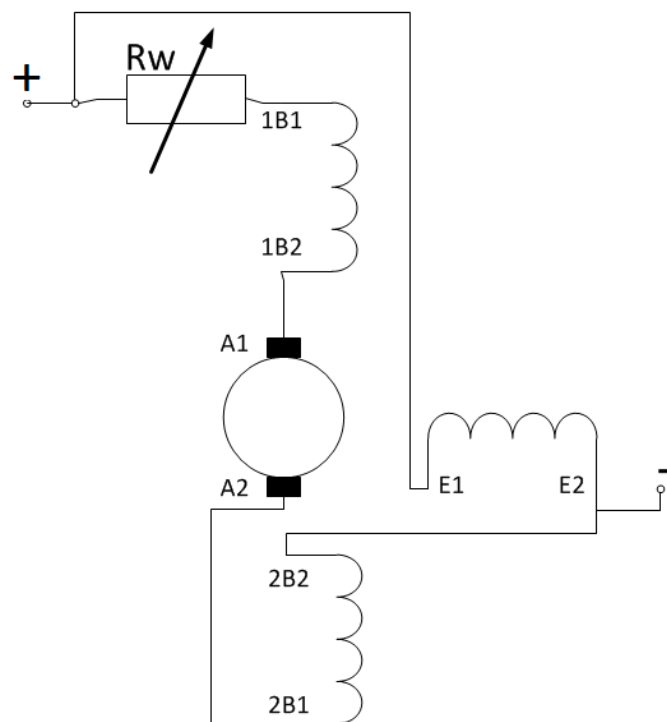
Identyfikację uzwojeń rozpoczyna się od poszukiwania par zacisków odpowiadających poszczególnym uzwojeniom. W tym celu stosuje się induktor lub inne rozwiązania sprzętowe do sprawdzenia stanu izolacji (miernik rezystancji izolacji). W taki sposób, poza wyznaczeniem końcówek należących do poszczególnych 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 dozwoleń szeregowego może nieznacznie różnić się od komutacyjnych.



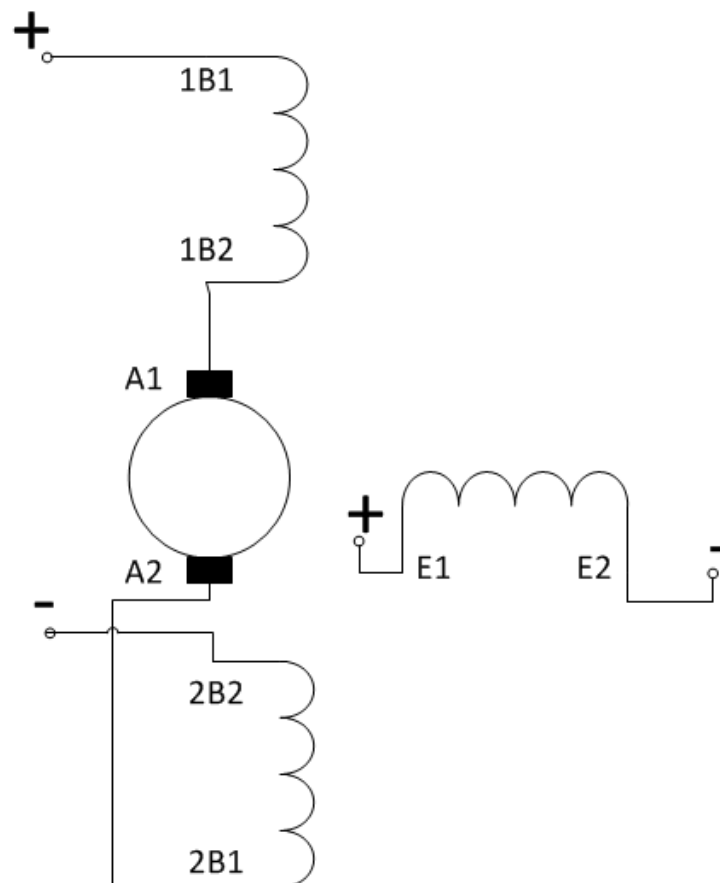
Rys. 1.49. Metoda prądu zmiennego identyfikacji uzwojeń komutacyjnych:
a) połączenie poprawne, b) połączenie błędne



Rys. 1.50. Połączenie uzwojeń silnika szeregowego



Rys. 1.51. Schemat połączeń uzwojeń silnika bocznikowego



Rys. 1.52. Schemat połączeń uzwojeń silnika obcowzbudnego

W praktyce wartości tych rezystancji mogą być porównywalne i warto przeprowadzić ich identyfikację lepszymi metodami. Bardzo wygodną metodą jest pomiar impedancji szeregowo połączonych uzwojeń wirnika i kolejnych uzwojeń o małej rezystancji. Wykonywane są dwa pomiary impedancji (Rys. 1.49) 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 jak uzwojenia kompensacyjnego) względem twornika impedancja ma wartość mniejszą. W przypadku uzwojenia szeregowego oraz ustawienia szczotek w strefie neutralnej impedancja dla obu połączeń jest jednakowa. W takim przypadku (równych impedancji) należy przyjąć, że szczotki są prawidłowo ustawione.

W większości maszyn prądu stałego mechanizm szczotkotrzymaczy może być nieznacznie przemieszczany 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 prawidłowo 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. 1.50) 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. 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. 1.51). 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 według schematu pokazanego na rys. 1.52.

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 na przykład komutacji prądu stałego w uzwojeniu wzbudzenia sprawdzić można indukowanie się napięcia po stronie twornika. Wysuwać należy szczotki kolejno w obu kierunkach, aż do uzyskania widocznego efektu. Położenie pośrednie wyznaczy strefę neutralną.

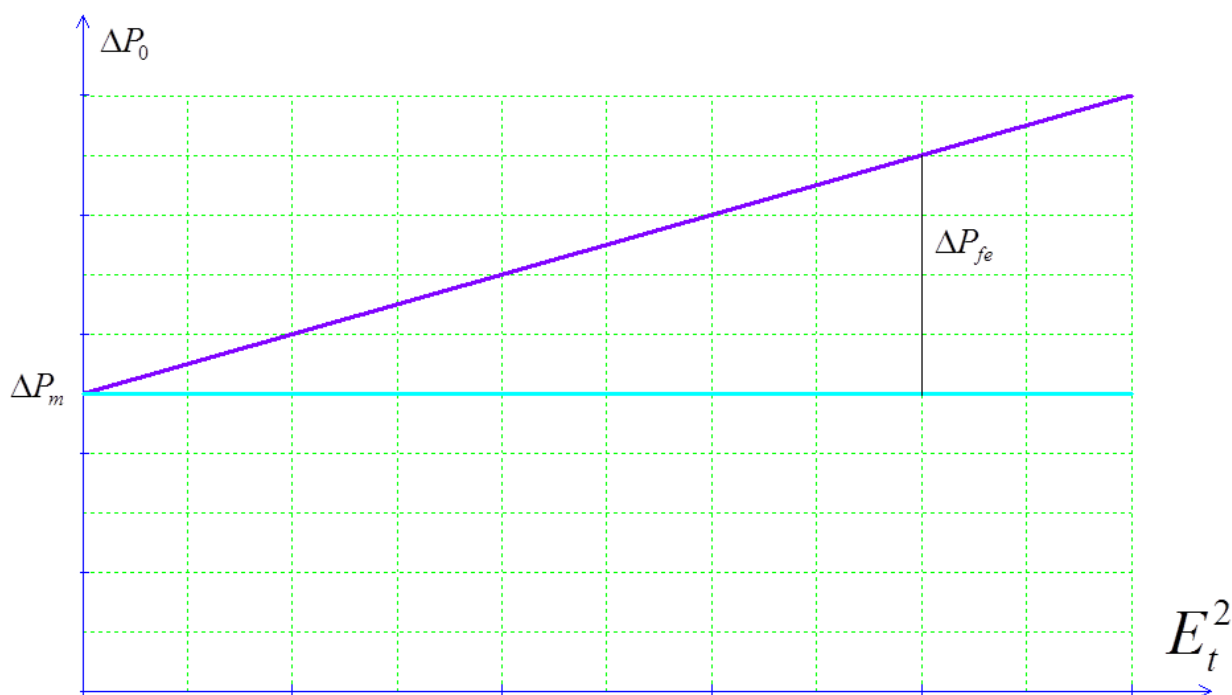
W maszynie prądu stałego występują straty mechaniczne, straty w żelazie i uzwojeniach. Znajomość wyznaczenia poszczególnych strat potrzebna jest do wyznaczenia sprawności, jak i oszacowania momentu wytwarzanego w maszynie. Straty w uzwojeniu twornika ustalamy poprzez pomiar rezystancji metodą techniczną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

Straty w uzwojeniu twornika liczymy z zależności:

$$\Delta P_t = R_t I_t^2. \quad (1.82)$$

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:

$$E_t = U_t - R_t I_t. \quad (1.83)$$



Rys. 1.53. Sposób wyznaczenia strat mechanicznych i strat w żelazie

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

$$\Delta P_0 = U_t I_t - \Delta P_t. \quad (1.84)$$

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

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 na przykład przy tej samej wartości siły elektromotorycznej, a więc tej samej wartości indukcji, zmierzmy 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:

$$P_{fe1} = c_h \omega_1 + c_w \omega_1^2, \quad (1.85)$$

$$P_{fe2} = c_h \omega_2 + c_w \omega_2^2. \quad (1.86)$$

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 .

$$c_h = \frac{P_{fe1}\omega_2^2 - P_{fe2}\omega_1^2}{\omega_1\omega_2^2 - \omega_2\omega_1^2}, \quad (1.87)$$

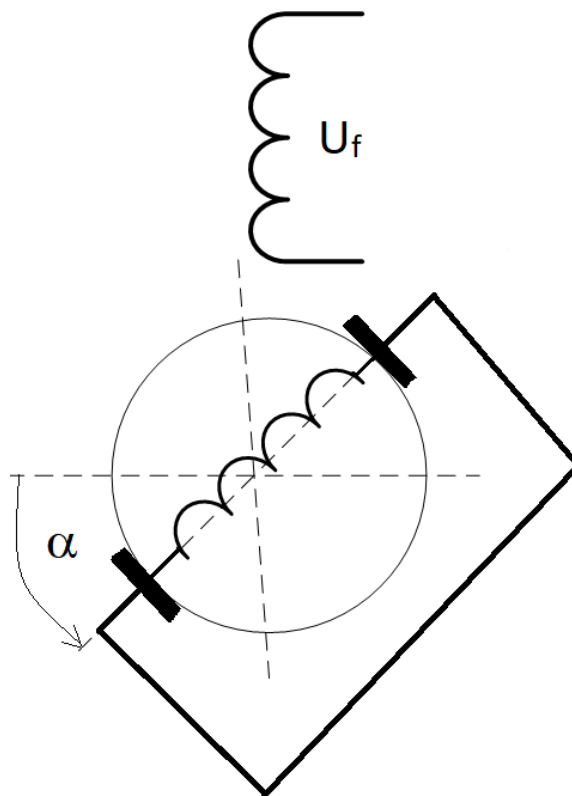
$$c_h = \frac{P_{fe2}\omega_1 - P_{fe1}\omega_2}{\omega_1\omega_2^2 - \omega_2\omega_1^2}. \quad (1.88)$$

otrzymując w ten sposób zależność na straty w żelazie przy dowolnej prędkości kątowej ω :

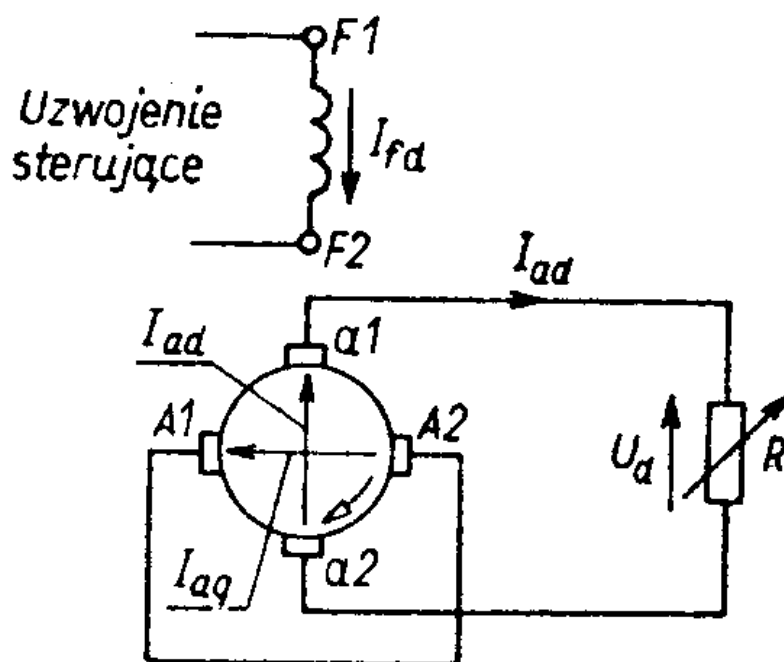
$$P_{fe} = c_h\omega + c_w\omega^2. \quad (1.89)$$

1.10. Maszyny specjalne

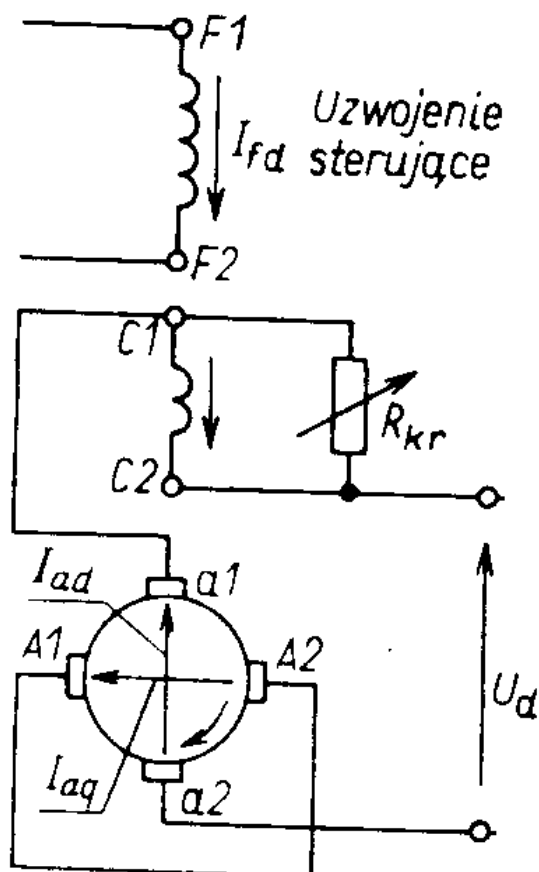
W praktyce używanych było wiele rozwiązań konstrukcyjnych maszyn o cechach konstrukcyjnych podobnych do maszyn prądu stałego. W dzisiejszych czasach ich funkcje przejęły różnorodne przekształtniki energoelektroniczne. Sposób budowy maszyn był zależny od celu ich stosowania. Przykładem może być silnik repulsyjny, który zasilany jest napięciem sinusoidalnym z sieci (rys. 1.54). Silnik tego typu budowany jest na małe moce i używany niekiedy tam, gdzie zachodzi potrzeba regulacji prędkości, między innymi stosowany był do nastawiania zwrotnic szynowych.



Rys. 1.54. Schemat połączeń silnika repulsyjnego [10]



Rys. 1.55. Schemat połączeń metadyny [10]

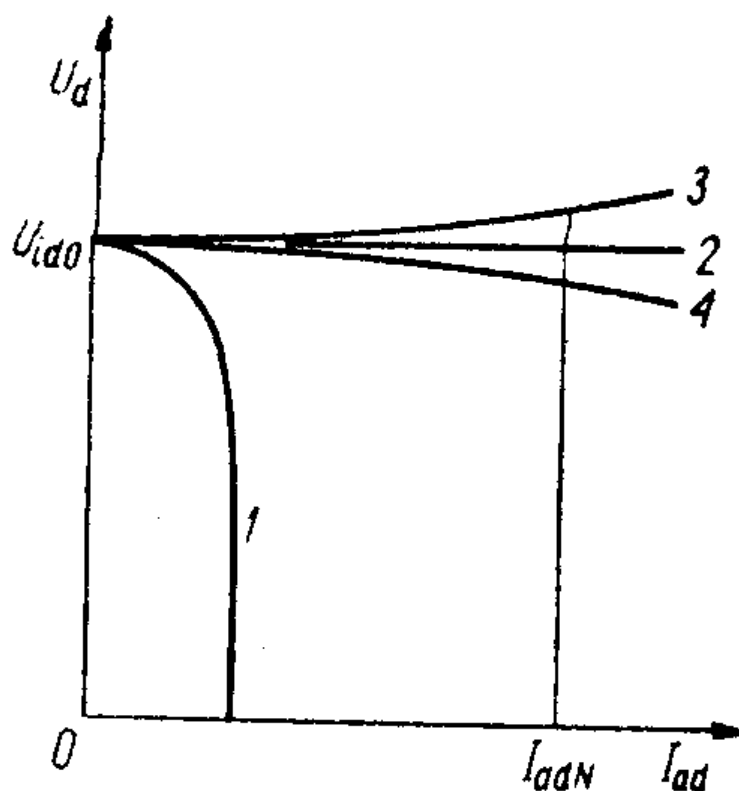


Rys. 1.56. Schemat połączeń amplidyny [10]

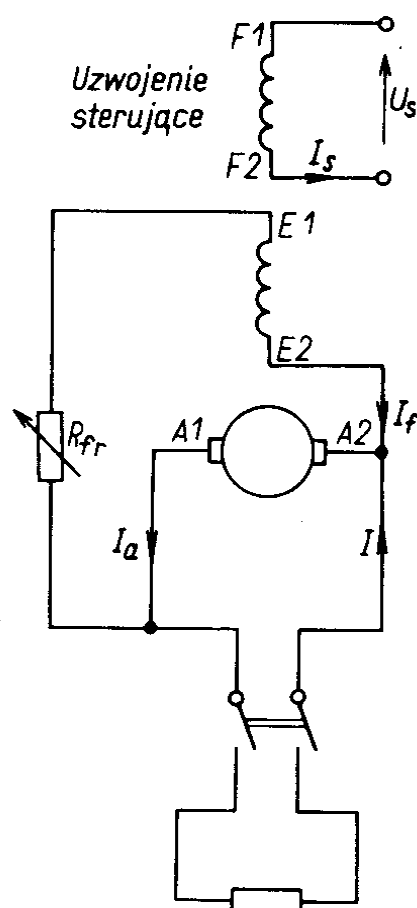
Układ połączeń silnika repulsyjnego jest bardzo prosty. W stanie znajduje się uzwojenie wzbudzenia zasilane z sieci 50 Hz. Szczotki ustawione na komutatorze wirnika są zwarte i mogą być wysuwane ze strefy geometrycznie neutralnej o kąt od zera do 90°.

W takim układzie, na skutek działania uzwojenia wzbudzenia, w zwartym wirniku indukują się napięcia o wartości zależnej od kąta położenia szczotek. Od tego kąta wysunięcia szczotek zależy moment silnika. Przez przesuwanie szczotek, przy silniku obciążonym, uzyskuje się więc łatwy sposób regulacji prędkości kątowej.

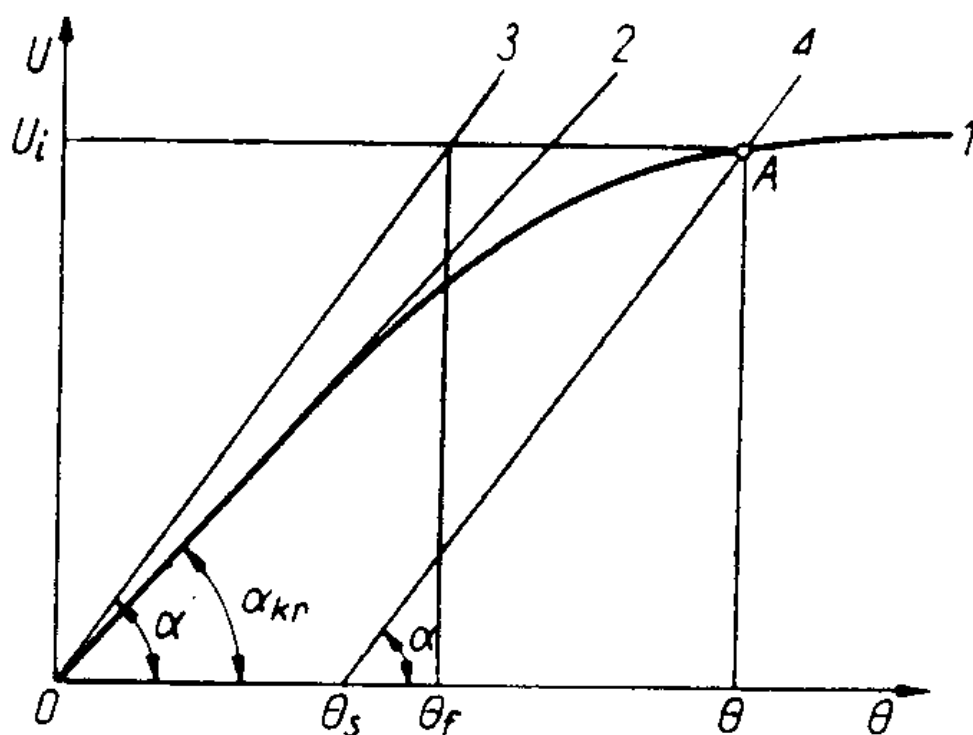
Część maszyn specjalnych prądu stałego wytwarza i wykorzystuje pole magnetyczne w dwóch osiach: q i d . Przykładem takiej maszyny jest metadyna (rys. 1.55), która zwykle wykorzystywana była jako źródło prądu stałego [10]. Wirnik maszyny połączony jest z silnikiem, zapewniając stałą wartość prędkości obrotowej. Prąd sterujący wytwarza pole magnetyczne w osi d . W osi q indukuje się siła elektromotoryczna i przy zwartych szczotkach płynie duży prąd I_q wytwarzając siłę elektromotoryczną w osi d , do którego przyłączony jest odbiornik. Prąd, płynąc w tym obwodzie, wytwarza strumień przeciwnie skierowany do strumienia sterującego. Dzięki temu poprzez zmianę prądu sterującego odpowiednio możemy przesuwać charakterystykę zewnętrzną (1 na rys. 1.57).



Rys. 1.57. Charakterystyki zewnętrzne metadyny i amplidyny [10]



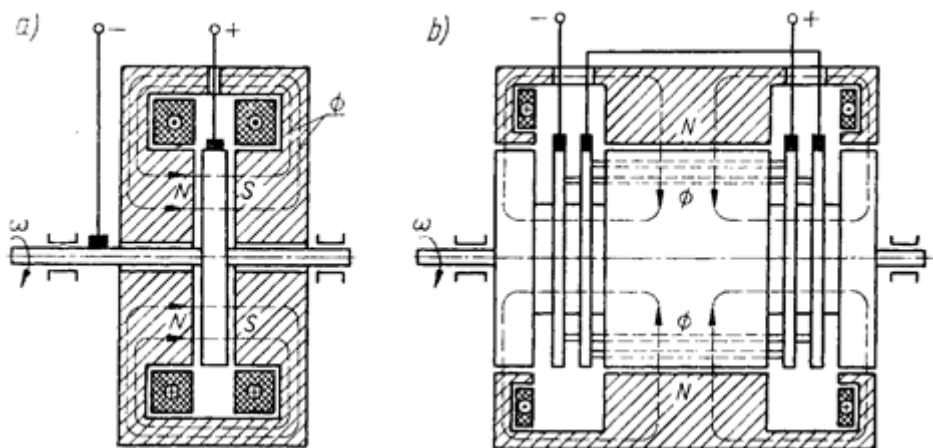
Rys. 1.58. Schemat połączeń rototrola [10]



Rys. 1.59. Charakterystyki rototrola [10]

Maszyna pokazana na rys. 1.56 to amplidyna. W osi podłużnej umieszczono uzwojenie kompensacyjne połączone szeregowo z obwodem twornika, dzięki czemu następuje kompensacja podłużnego przepływu twornika. Współczynnik wzmocnienia mocy sięga w praktycznie używanych amplidynach wartości 500-1000. Amplidyna nazywana często dwustopniowym wzmacniaczem elektromaszynowym. Charakterystyki zewnętrzne amplidyny pokazano na rys. 1.57. Krzywa nr.2 przedstawia maszynę idealnie skompensowaną, 3 przekompensowaną, 4 niedokompensowaną.

Rototrol (rys. 1.58) jest prądnicą prądu stałego (bocznikową) z dodatkowym uzwojeniem sterującym F1-F2 zasilanym z obcego źródła. Rys. 1.59 przedstawia charakterystyki rototrola. Prosta 2 określa rezystancję krytyczną w obwodzie wzbudzenia. Prosta 3 określa stan, przy którym nie nastąpi samowzbudzenie się prądnicy. Jeśli w takim stanie włączymy przepływ prądu przez uzwojenie F1-F2 wytwarzając przepływ zgodny z przepływem I_f to skutek będzie taki sam, jak gdyby prosta 3 przesunęła się do pozycji prostej 4. Następuje wówczas samowzbudzenie się maszyny. Maszyna ta była wykorzystywana jako wzmacniacz o współczynniku wzmocnienia 500-1000.



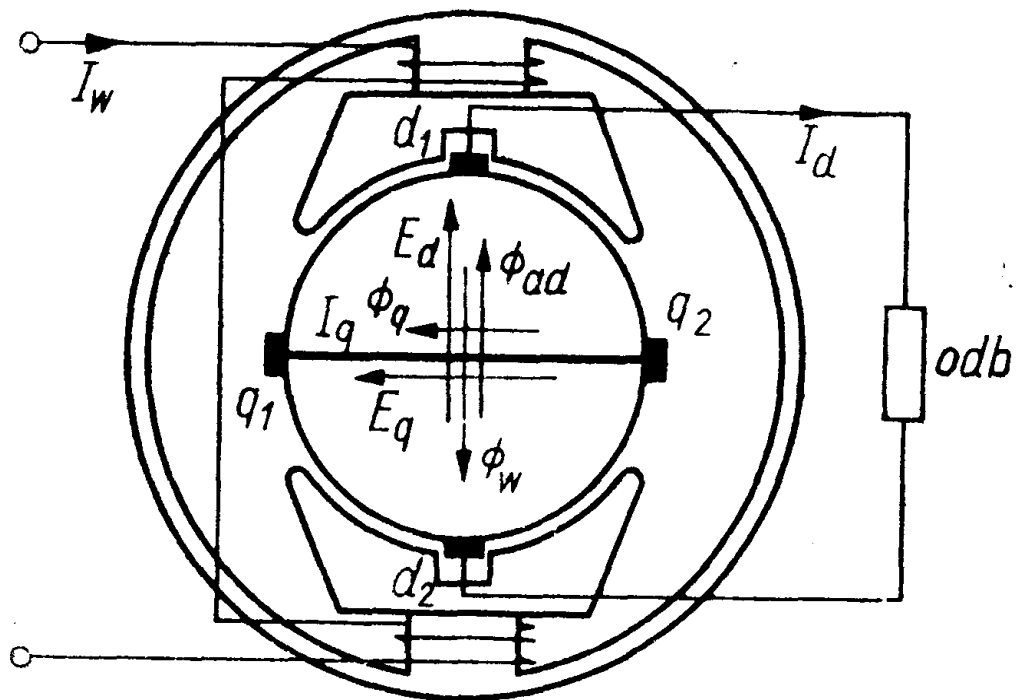
Rys. 1.60. Maszyna unipolarna [10]: a) typ promieniowy; b) typ osiowy o dwóch parach pierścieni

Ciekawą konstrukcję przedstawia rys. 1.60. Jest to prądnica unipolarna (homopolarna). Prądnica jest maszyną prądu stałego bez komutatora. Zasada jej działania tej maszyny polega na tym, że elementy, w których indukują się napięcia, poruszają się w polu o stałej biegunowości.

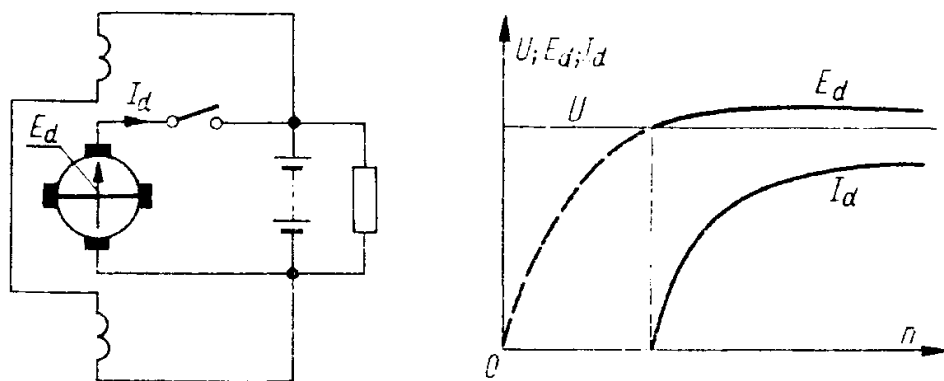
W prądnicy o wykonaniu promieniowym (rys. 1.60a) tarcza osadzona na wale obraca się w polu magnetycznym wytworzonym przez prąd wzbudzający, płynący w dwóch cewkach stojana. Napięcie w tarczy indukuje się w kierunku promieniowym i jest odbierane za pośrednictwem szczotek, z których jedne (np. „+ „) znajdują się na obwodzie tarczy,

a drugie na wale maszyny. W maszynie o wykonaniu osiowym (rys. 1.60 b) strumień w szczelinie jest skierowany promieniowo, w wirniku umieszczone są pręty zwarte po obu stronach pierścieniami, do których przylegają szczotki. Dla zwiększenia napięcia można wykonać kilka klatek z oddzielnymi pierścieniami i połączyć je szeregowo. Maszyny unipolarne dają bardzo niskie napięcia, dlatego były używane do elektrolizy, poza tym mają zastosowanie tam, gdzie jest wymagana duża stałość napięcia, bez zakłóceń wprowadzanych przez komutator.

Jednym z zastosowań maszyny z polem poprzecznym jest wykorzystanie jej do oświetlenia wagonów. Maszynie takiej stawia się wymagania, aby napięcie było stałe przy dużych różnicach prędkości obrotowej oraz by biegunowość napięcia była niezależna od kierunku wirowania wirnika ze względu na współpracę z baterią akumulatorów. Warunki te spełnia prądnica przedstawiona na rys. 1.61, zwana maszyną Rosenberga. Ma ona dwie pary szczotek. Szczotki poprzeczne q_1 - q_2 są zwarte, a do szczotek podłużnych d_1 - d_2 przyłączony jest obwód obciążenia. Aby reluktancja strumienia poprzecznego była możliwie mała, nabiegunniki mają duże wymiary. Jeśli prądnicę wzbudzi się z baterii akumulatorów, to na szczotkach q_1 — q_2 indukuje się napięcie i w zwartym obwodzie popłynie prąd poprzeczny I_q , który wytworzy strumień poprzeczny Φ_q . Strumień ten indukuje napięcie w obwodzie podłużnym i przy włączeniu odbiornika płynie prąd I_d . Prąd ten wytwarza własny strumień w osi podłużnej Φ_{ad} . W osi tej działa ostatecznie strumień wypadkowy $\Phi_d = \Phi_w - \Phi_{ad}$, który określa wartość prądu poprzecznego. Jeżeli prędkość wzrasta, napięcie praktycznie nie rośnie, gdyż niewielki jego wzrost powoduje wzmocnienie roz magnesowującego działania prądu I_d , wobec czego strumień Φ_d maleje i zmniejsza się wartość prądu i strumienia poprzecznego. Przy przeciwnym kierunku prędkości zmienia się zwrot napięcia indukowanego w obwodzie poprzecznym wirnika, a zatem zwrot prądu I_q i strumienia Φ_q , ale biegunowość napięcia na szczotkach d_1 — d_2 pozostaje ta sama. Układ połączeń prądnicy do oświetlania wagonów z baterią akumulatorów oraz jej charakterystyki przedstawia rys. 1.62. W czasie postoju pociągu lub przy małych prędkościach wyłącznik jest otwarty i oświetlenie jest zasilane przez akumulatory. Począwszy od pewnej prędkości (przy szybkości jazdy ok. 15—20 km/godz), napięcie E_d staje się wyższe od napięcia baterii, wyłącznik zamyka się i prądnica zasila sieć oświetleniową, ładując jednocześnie baterię.



Rys. 1.61. Schemat budowy prądnicy do oświetlenia wagonów



Rys. 1.62. Prądnica do oświetlania wagonów współpracująca z baterią akumulatorów

2. Maszyny synchroniczne

2.1. Maszyny synchroniczne - budowa

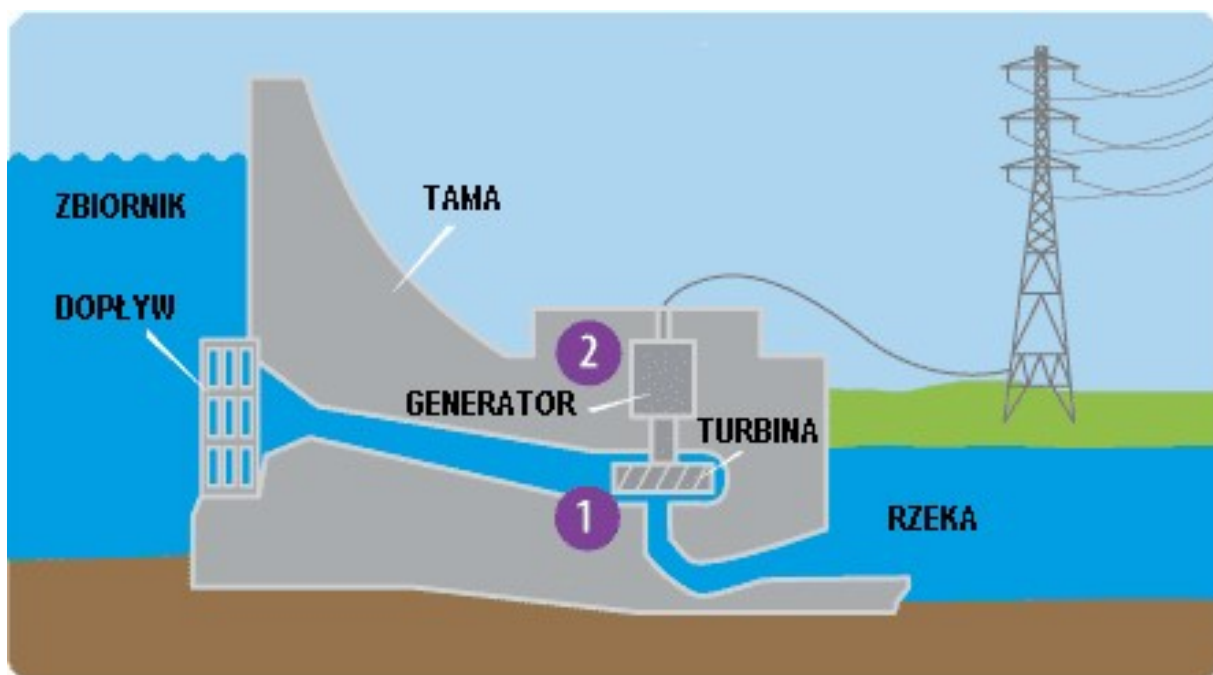
Maszyny synchroniczne używane są przede wszystkim do zamiany energii ruchu obrotowego na energię elektryczną (generator). W elektrowniach cieplnych używa się generatorów z wirnikiem cylindrycznym (turbogeneratorów) (rys. 2.4 i rys. 2.5), a w elektrowniach wodnych wykorzystywane są maszyny jawnobiegunowe (hydrogeneratory). Zasada działania generatora opiera się na zasadzie indukowania wartości napięcia (siły elektromotorycznej rotacji) na skutek ruchu pola magnetycznego, wytworzonego przez prąd stały przepływający przez uzwojenie wirnika, względem nieruchomego trójfazowego uzwojenia w stojanie. Trójfazowe uzwojenie stojana ma konstrukcję identyczną jak uzwojenie stojana maszyny indukcyjnej [13]. Napędem ruchu wirnika może być na przykład ruch wody w hydrogeneratorach (rys. 2.1) lub ruch pary wodnej w turbogeneratorach (rys. 2.4). Prędkość kątowna wirnika hydrogeneratora jest stosunkowo mała (rzędu 300 obr/min), stąd jego budowa jest odwrócona w stosunku do maszyny prądu stałego. Bieguny są wyraźnie widoczne (rys. 2.2), wirnik zwykle ma średnicę znacznie większą od długości, stąd szczelina powietrzna pomiędzy stojanem a wirnikiem wyraźnie zmienia się w zależności od kąta.



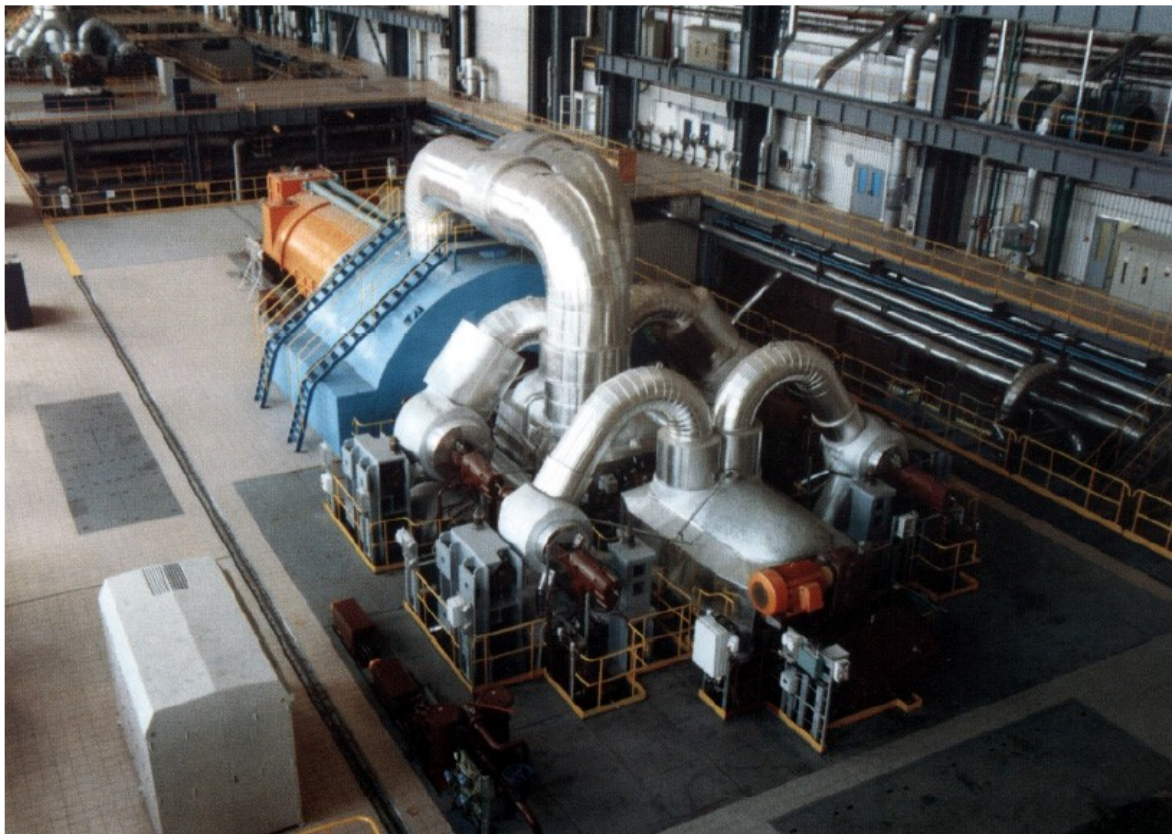
Rys. 2.1. Zapora elektrowni wodnej [6]



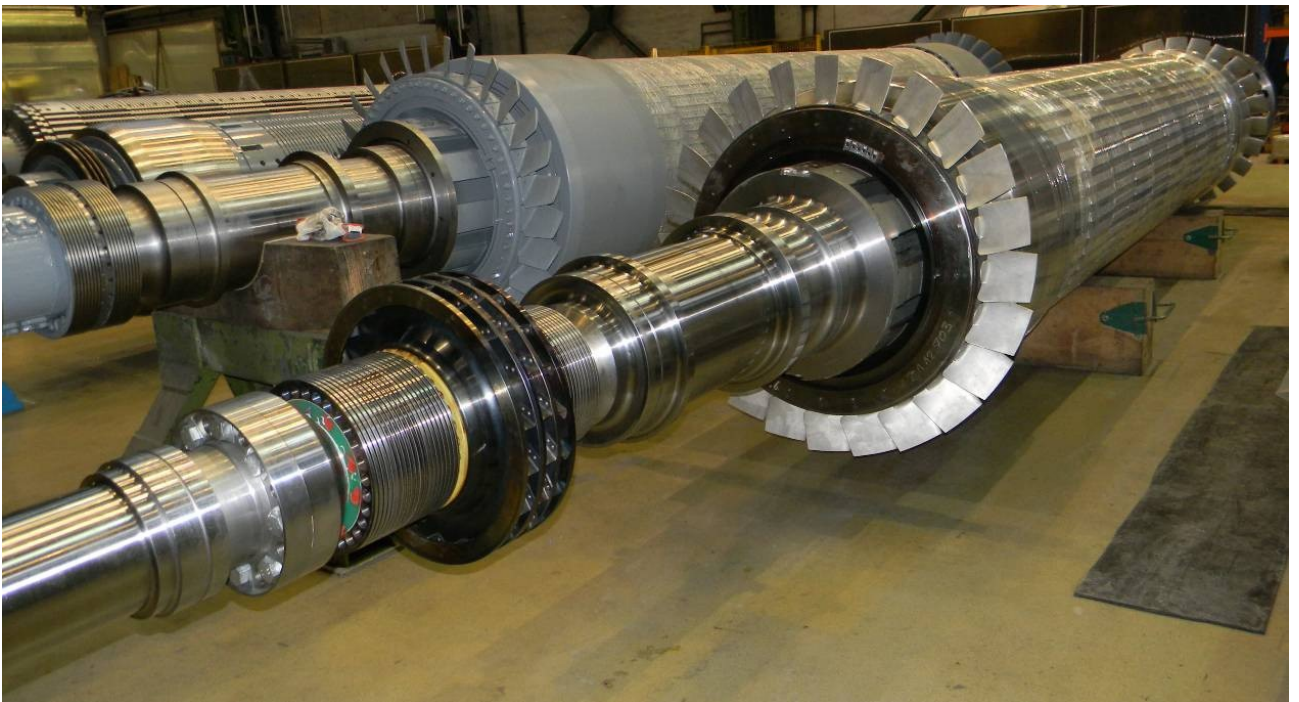
Rys. 2.2. Wirnik hydrogeneratora [5]



Rys. 2.3. Schemat ideowy elektrowni wodnej [6]

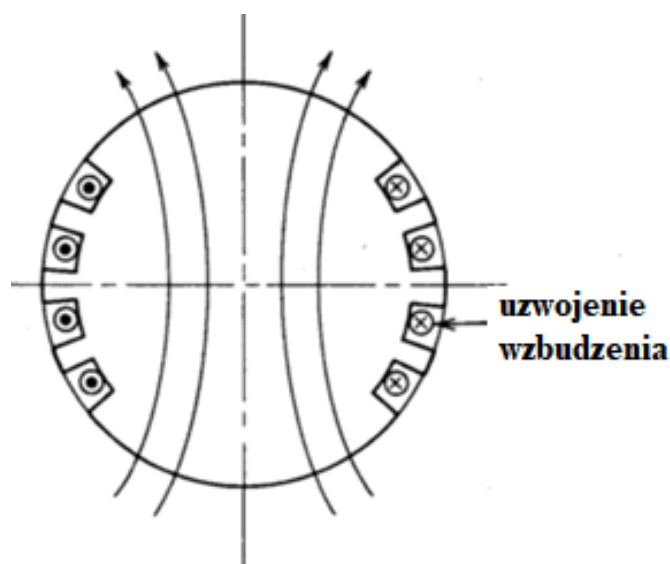


Rys. 2.4. Turbina parowa i turbogenerator[7]

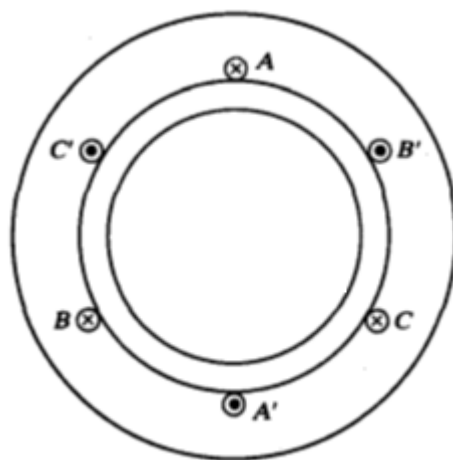


Rys. 2.5. Wirnik turbogeneratorsa [6]

Zwykle siłą wymuszającą ruch wirnika jest przepływ wody wymuszony przez zastosowanie tamy wodnej z wyróżnionym otworem dopływowym (rys. 2.3) doprowadzającym strumień wody do turbiny sprzężonej mechanicznie z wałem hydrogeneratora. Z uwagi na ograniczenia wytrzymałościowe izolacji stosowanej w maszynach napięcie generatora jest rzędu kilkudziesięciu kV (do 30 kV). Za generatorem umieszczony jest zwykle transformator blokowy zwiększający napięcie w celu przesłania energii elektrycznej na duże odległości. Turbogenerator pracuje zwykle ze znacznie większą prędkością obrotową (3000/3600 obr/min), stąd konieczne jest symetryczne rozłożenie masy wirującego wirnika względem jego osi obrotu. Taki wirnik ma mniejszą średnicę, lecz większą długość (rys. 2.5), a uzwojenie umieszczone jest w żłobkach w sposób podobny do wirnika pierścieniowego silnika indukcyjnego [13].



Rys. 2.6. Przekrój wirnika turbogeneratorskiego [14]



Rys. 2.7. Trójfazowy generator cylindryczny [14]

Na rys. 2.6 pokazano przekrój wirnika maszyny synchronicznej cylindrycznej (turbogenerators). Maszyny te pracuj z większą prędkością obrotową, wynikającą z szybkości ruchu pary wodnej wykorzystywanej do napędu turbin parowych. Zwykle maszyny takie mają dwa lub cztery bieguny (liczba par biegunów jest równa 1 lub 2). W łbkach, umieszczonych w cylindrycznym ferromagnetycznym wirniku, ułżone jest uzwojenie wzbudzenia, którego celem jest wytworzenie stałego, względem wirującego wirnika, pola magnetycznego. Uzwojenie powinno wytworzy pole magnetyczne o sinusoidalnym rozkłdzie indukcji na obwodzie maszyny. Wirnik jest obracany ze stałą prędkością obrotową, nazywaną prędkością synchroniczną n_s . Sinusoidalny rozkłd pola magnetycznego uzyskiwany jest w hydrogeneratorach poprzez odpowiednie kształtowanie szczeliny powietrznej, natomiast w turbogeneratorach poprzez rozłżenie uzwojenia na obwodzie wirnika.

Na skutek obrotu wirnika w trójfazowym uzwojeniu (rys. 2.7) stojana indukują si napięcia, których wartość chwilową (przy załżeniu symetrii uzwojeń oraz sinusoidalnego rozkłądu pola magnetycznego na obwodzie maszyny) w każdej fazie (u_A , u_B , u_C) można opisa zależnościami:

$$u_A = U_m \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

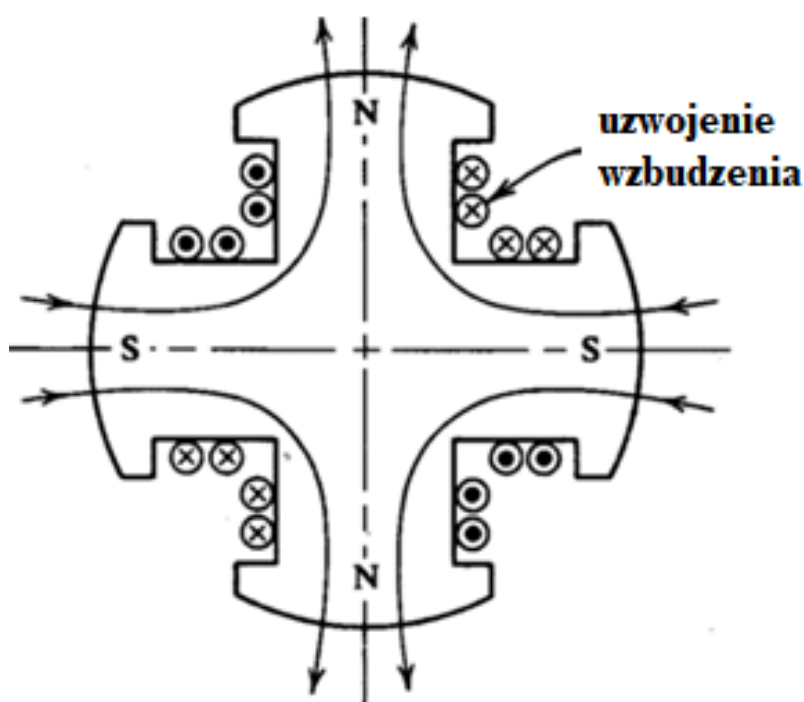
$$u_B = U_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad (2.2)$$

$$u_C = U_m \sin(\omega t + 120^\circ). \quad (2.3)$$

Wartość maksymalna U_m napięcia jest proporcjonalna do wartości maksymalnej indukcji, prędkości wirowania wirnika oraz liczby zwojów w poszczglnych fazach i sposobu rozłżenia uzwojeń w żłóbkach stojana. Częstotliwość napięć indukowanych zależy od prędkości wirowania wału wirnika oraz liczby par biegunów:

$$f = \frac{n_s p}{60}. \quad (2.4)$$

W maszynie jawnobiegunowej (hydrogenerator) rozkłd wartości indukcji na obwodzie kształtowany jest poprzez zmian grubości szczeliny powietrznej pomiędzy nabiegunnikami biegunów w rdzeniu stojana. Uzwojenie wzbudzenia jest wykonane w sposób zbliżony do budowy stojana maszyny prądu stałego (rys. 2.8). Wirujący wirnik wytworzy zatem sinusoidalne przebiegi napięć indukowanych o wartościach chwilowych podanych równaniami 2.1-2.3. Istotną rżnic w budowie maszyny jest nierównomierna szczelina powietrzna pomiędzy stojanem a wirnikiem hydrogeneratora. Różnica ta w znacznym stopniu utrudnia analiz pracy takich maszyn.



Rys. 2.8. Przekrój wirnika hydrogeneratora [14]

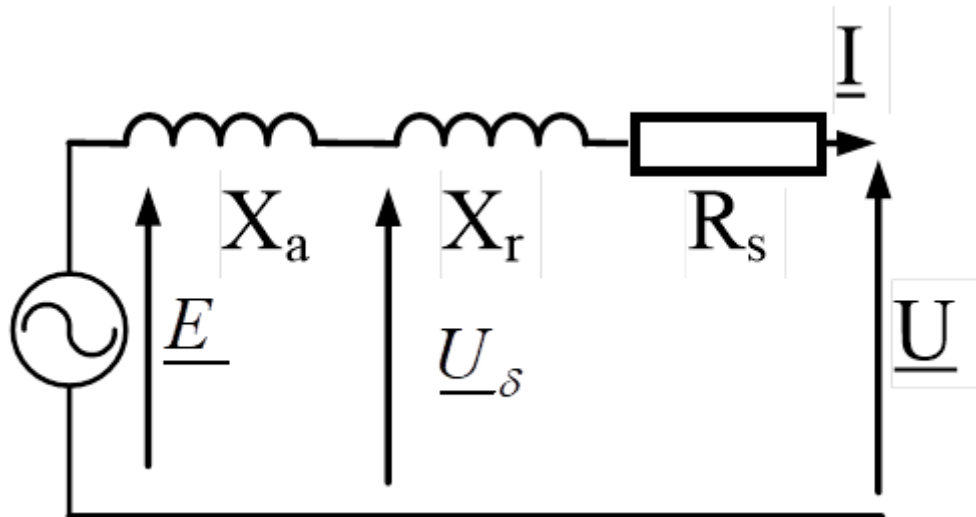
2.2. Schemat zastępczy maszyny cylindrycznej (turbogeneratora)

Możemy przyjąć, że w maszynie cylindrycznej grubość szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem jest stała. W wyniku obrotu wirnika pojawia się napięcie w uzwojeniach stojana. Jeśli do zacisków stojana dołączymy symetryczne obciążenie, w uzwojeniach stojana popłynie prąd. Prąd w trójfazowym uzwojeniu, zgodnie z prawem przepływu oraz warunkami wytworzenia wirującego pola kołowego, wytworzy pole magnetyczne, którego prędkość jest zależna (identycznie jak w maszynie indukcyjnej) od częstotliwości oraz liczby par biegunów, czyli prędkości synchronicznej:

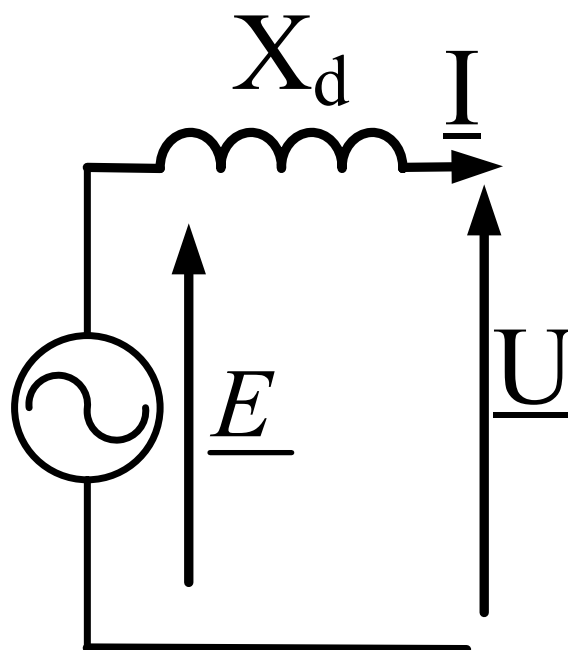
$$n_s = \frac{60f}{p}. \quad (2.5)$$

Ten składnik pola magnetycznego nazywany jest reakcją twornika, a wielkością używaną w modelach matematycznych jest odpowiednia wartość indukcyjności reakcji twornika L_a . W stanie ustalonym, przy znanej wartości częstotliwości używamy w opisie schematu zastępczego pojęcia reaktancji reakcji twornika X_a . Wielkość ta jest wyznaczona przez wartość napięcia indukowanego od tego składnika pola magnetycznego. Napięcie na zaciskach generatora będzie zatem skutkiem wypadkowego pola magnetycznego oraz zależy także od wartości rezystancji uzwojenia stojana oraz części pola magnetycznego, które jest

wytwarzane przez prądy stojana, a obejmuje swoim zasięgiem tylko uzwojenia w stojanie. Taka część strumienia skojarzonego z uzwojeniem stojana nazywana jest odpowiednio indukcyjnością L_r oraz reaktancją X_r rozproszenia. Schemat zastępczy turbogeneratora przedstawiono na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Schemat zastępczy turbogeneratora



Rys. 2.10. Uproszczony schemat zastępczy turbogeneratora

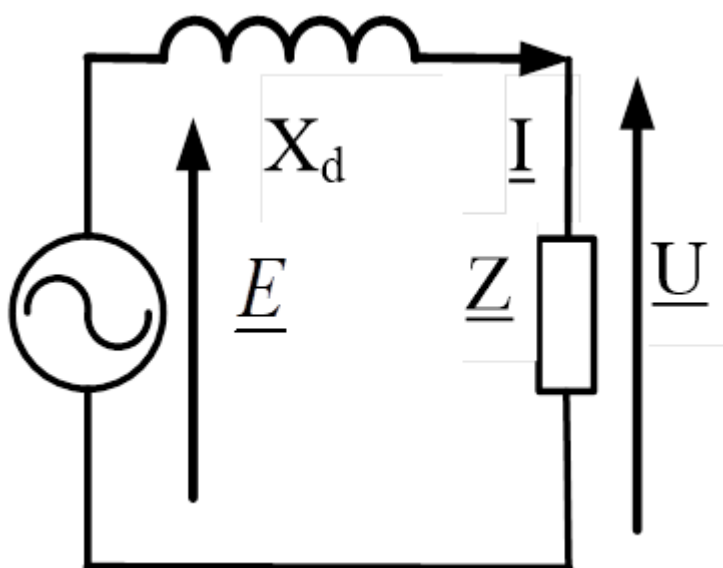
W schemacie występują dwie reaktancje połączone ze sobą szeregowo. Ich sumę nazywamy reaktancją synchroniczną X_d . Wartość tej reaktancji jest znacznie większa od wartości rezystancji uzwojenia stojana:

$$X_d = X_a + X_r \gg R_s. \quad (2.6)$$

W związku z tym często w schemacie zastępczym zwykle pomija się wartość rezystancji uzwojenia stojana. Tak uproszczony schemat zastępczy pokazano na rys. 2.10.

2.3.Praca samotna

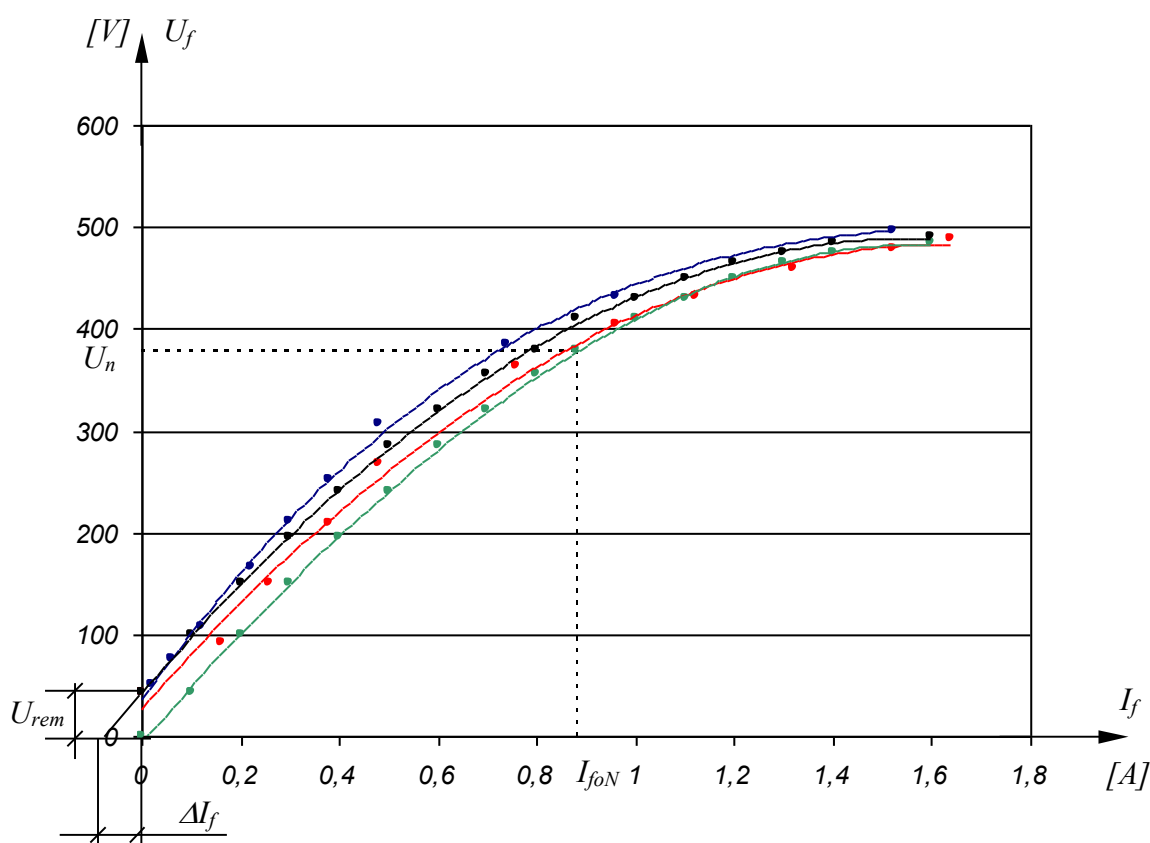
Maszyna synchroniczna może pracować jako pojedynczy generator zasilający grupę odbiorników o wypadkowej impedancji $\underline{Z}$. Uproszczony schemat zastępczy maszyny cylindrycznej przy pracy samotnej pokazano na rys. 2.1. W przypadku, gdy obwód stojana jest otwarty, wartość prądu jest równa zero, a napięcie na zaciskach jest równe napięciu indukowanemu na skutek pola magnetycznego wytworzonego przez wzbudzony i wirujący wirnik maszyny.



Rys. 2.11. Uproszczony schemat zastępczy turbogeneratorsa przy pracy samotnej

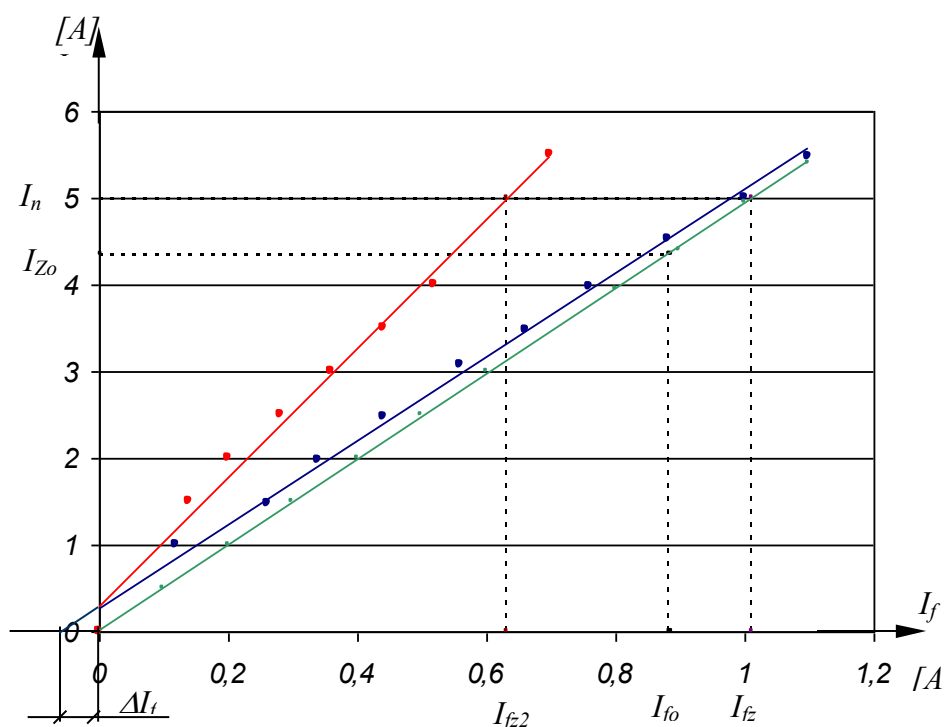
Stan taki nazywa się biegiem jałowym, a jedną z najważniejszych charakterystyk tej maszyny wyznaczamy jako zależność napięcia na zaciskach generatora przy biegu jałowym od wartości prądu wzbudzenia. Należy przy tym pamiętać, że na skutek istnienia remanentu magnetycznego, przy zerowej wartości prądu wzbudzenia napięcie, ma wartość większą od zera. W praktyce próbę biegu jałowego rozpoczynamy od pomiaru tego napięcia. Prąd wzbudzenia zwiększamy płynnie w górę, rejestrując wartości poszczególnych punktów

charakterystyki biegu jałowego przy zwiększaniu prądu wzbudzenia (linia czerwona na rys. 2.12). Prąd wzbudzenia zwiększamy aż do uzyskania stanu nasycenia obwodu magnetycznego. W następnej kolejności płynnie zmniejszamy prąd wzbudzenia. Z uwagi na użycie materiału ferromagnetycznego występuje tu histereza magnetyczna, stąd linia wyznaczająca zależność napięcia od prądu wzbudzenia przy obniżaniu wartości prądu wzbudzenia przebiega wyżej (linia niebieska na rys. 2.12).



Rys. 2.12. Charakterystyka biegu jałowego maszyny synchronicznej

Konieczne jest uśrednienie punktów obu krzywych, wskutek czego uzyskamy linię czarną na rys. 2.12. Ekstrapolujemy przebieg tej funkcji aż do przecięcia się z osią OX , wyznaczając w ten sposób prąd ΔI_f . Charakterystykę przesuwamy o wartość prądu ΔI_f , uzyskując w ten sposób charakterystykę biegu jałowego, która jest niezależna od wartości remanentu i histerezy magnetycznej. Ostateczna postać (linia zielona) wyznacza nam charakterystykę biegu jałowego, która będzie wykorzystywana w ocenie zachowania się maszyny synchronicznej w czasie obciążenia. Istotną wartością, jaką uzyskamy po opisanej wyżej analizie wyników badań, jest wartość znamionowa prądu wzbudzenia przy biegu jałowym. Możemy zdefiniować ją jako wartość prądu wzbudzenia przy znamionowej wartości napięcia odczytaną z wyżej opisanej charakterystyki biegu jałowego.



Rys. 2.13. Charakterystyki zwarcia ustalonego generatora synchronicznego – wyniki pomiarów

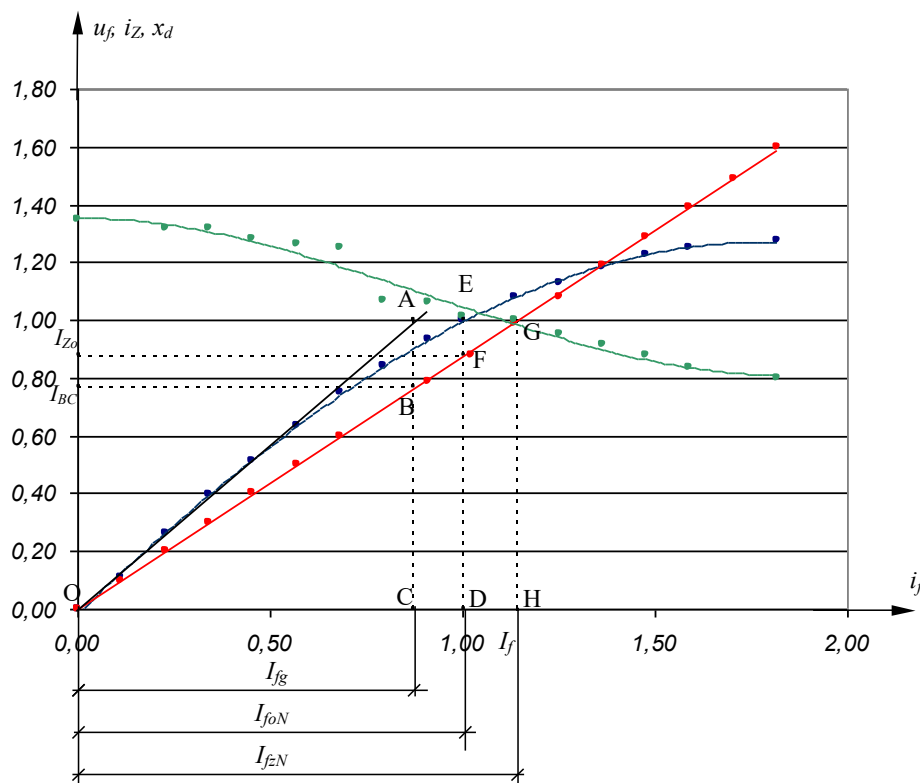
W przypadku próby zwarcia ustalonego musimy uwzględnić wartość remanentu magnetycznego. Pomijamy tu efekt nasycenia i histerezę. Wynika to z faktu roz magnesowującego działania reakcji twornika przy zwarcu. Na rys. 2.13 pokazano kształt rzeczywistej charakterystyki trójfazowego (linia niebieska) oraz dwufazowego (linia czerwona) zwarcia ustalonego. Widoczny jest tu wpływ pozostałości magnetycznej (remanentu magnetycznego). Efekt ten korygujemy w sposób podobny jak przy biegu jałowym. Otrzymamy wówczas charakterystykę zwarcia ustalonego niezbędną do wyznaczenia znamionowej wartości prądu magnesującego przy zwarcu, jak i do obliczenia zależności wartości reaktancji synchronicznej od prądu wzbudzenia (rys. 2.14).

W celu wyznaczenia wartości reaktancji synchronicznej dla danej wartości prądu wzbudzenia z charakterystyki biegu jałowego wyznaczamy wartość siły elektromotorycznej (np. odcinek DE na rys. 2.14), następnie z krzywej zwarcia wyznaczamy wartość prądu twornika (odcinek DF) dla tej samej wartości prądu wzbudzenia. Wartość reaktancji reakcji twornika (przy pominięciu rezystancji stojana) wyznaczona jest zależnością (2.7).

$$X_d = \frac{DE}{DF}. \quad (2.7)$$

Niekiedy konieczna jest znajomość wartości reaktancji synchronicznej nienasyconej X_{dn} , której wartość wyznacza się na podstawie charakterystyki zwarcia oraz prostoliniowej części charakterystyki biegu jałowego. Zgodnie z rys. 2.14 wartość takiej reaktancji wyznaczają odcinki CA i CB:

$$X_{dn} = \frac{CA}{CB}. \quad (2.8)$$



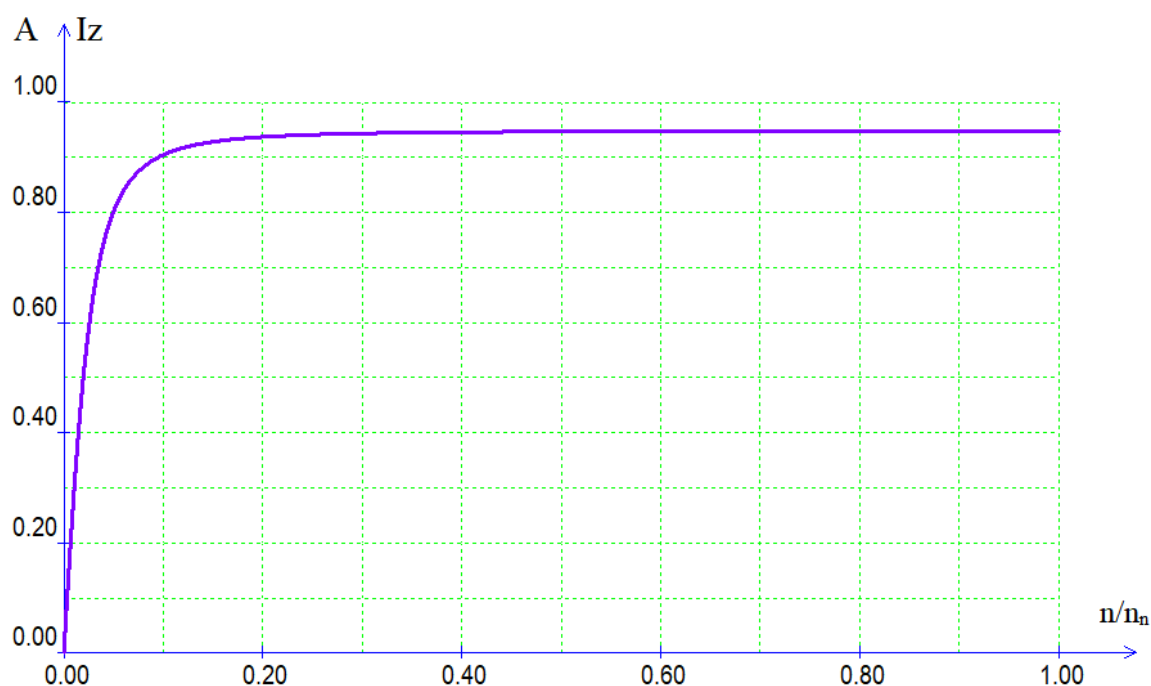
Rys. 2.14. Wyznaczanie zależności reaktancji synchronicznej X_d od wartości prądu wzbudzenia (linia zielona), wyniki pomiarów w wielkościach względnych

Opisane wyżej zależności są prawidłowe przy pominięciu wartości rezystancji uzwojeń stojana. Dowodem na skuteczność takiego uproszczenia jest wykonanie próby zwarcia ustalonego w zależności od prędkości obrotowej (przy stałej wartości prądu wzbudzenia) (rys. 2.15).

Wartość skuteczna prądu zwarcia może być wyznaczona wówczas z zależności (2.9).

$$I_z = \frac{E}{\sqrt{R_s^2 + X_d^2}}. \quad (2.9)$$

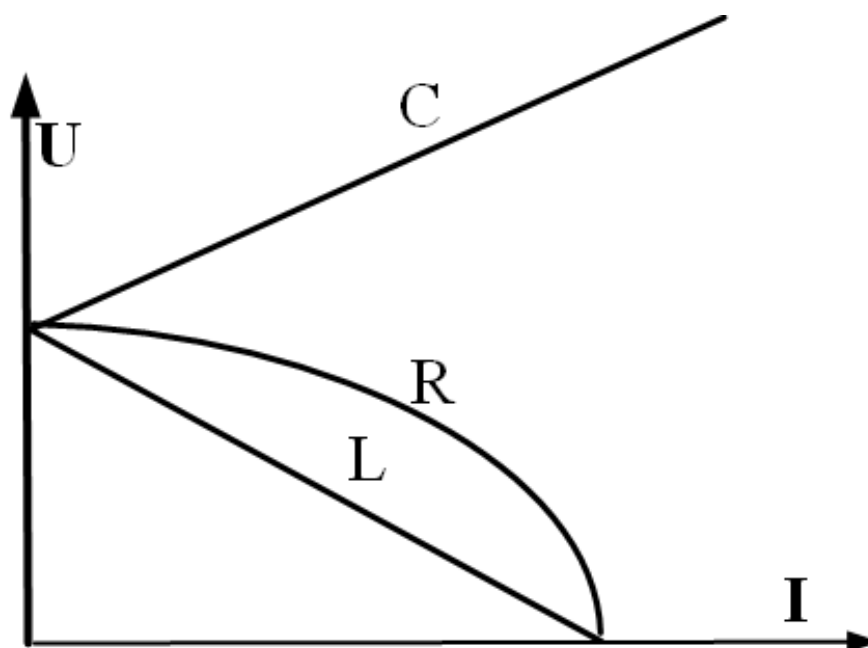
W przypadku, gdy wartość reaktancji jest znacznie większa od rezystancji, z uwagi na fakt zależności siły elektromotorycznej i reaktancji od prędkości obrotowej wartość prądu zwarcia jest praktycznie niezależna od prędkości obrotowej. Dopiero przy zmniejszeniu prędkości poniżej kilku procent prędkości znamionowej zauważalny jest wpływ rezystancji (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Zależność prądu zwarcia ustalonego od prędkości obrotowej

W pracy generatora synchronicznego na obciążenie o różnym charakterze ważna jest znajomość zmian napięcia na zaciskach pod wpływem zmian wartości prądu obciążenia. Charakterystyki takie nazywane są charakterystykami zewnętrznymi (rys. 2.16). Kształt charakterystyk zewnętrznych pokazanych na rys. 2.16 można wyjaśnić na podstawie wykresów wskazowych dla różnych charakterów obciążeń. Na rys. 2.17 pokazano wykresy wskazowe dla wybranych typów obciążeń. Rys. 2.17a pokazuje położenie wektorów napięcia, siły elektromotorycznej oraz spadku napięcia na reaktancji synchronicznej przy idealnym charakterze indukcyjnym. Wartość napięcia na zaciskach jest wynikiem odejmowania spadku napięcia na reaktancji od wartości E . Przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego wielkości te są liniowo zależne, więc charakterystyka jest linią prostą, gdzie wartość prądu przy napięciu równym zero wyznacza nam wartość prądu zwarcia. Rys. 2.17b prezentuje zależność tych wielkości przy obciążeniu idealnym pojemnościowym. W tym przypadku napięcie na zaciskach liniowo rośnie wraz ze wzrostem wartości prądu i przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego nie jest możliwe uzyskanie punktu zwarcia. Oczwistym jest, że na skutek nasycenia obwodu magnetycznego napięcie będzie wzrastało według nieliniowej zależności. Na rys. 2.17c spadek napięcia na reaktancji jest pod kątem prostym do napięcia na zaciskach, stąd wartość siły

elektromotorycznej jest przekątną trójkąt prostokątnego. Zmiana napięcia na zaciskach, przy stałej wartości siły elektromotorycznej, maleje przy zwiększaniu prądu w sposób nieliniowy.

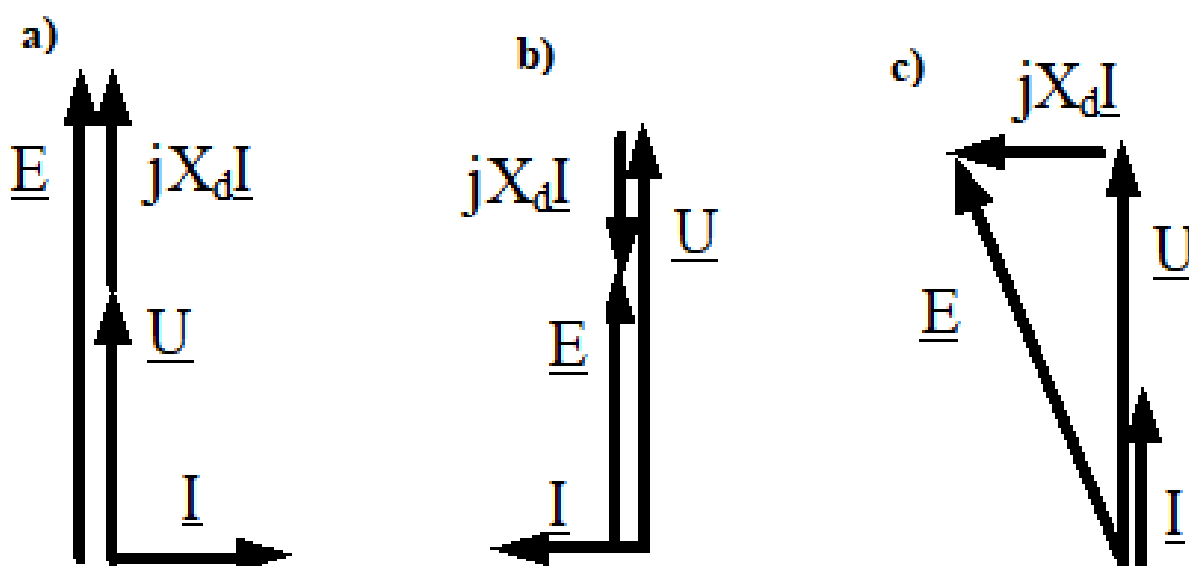


Rys. 2.16. Charakterystyki zewnętrzne ($I_f = \text{const.}$ $n = \text{const.}$) generatora synchronicznego przy pominięciu nasycenia i rezystancji uzwojeń stojana dla różnych typów obciążeń:

(L) – idealny indukcyjny ($\cos \varphi = 0_{\text{ind}}$)

(C) – idealny pojemnościowy ($\cos \varphi = 0_{\text{poj}}$)

(R) – rezystancyjny ($\cos \varphi = 1$)

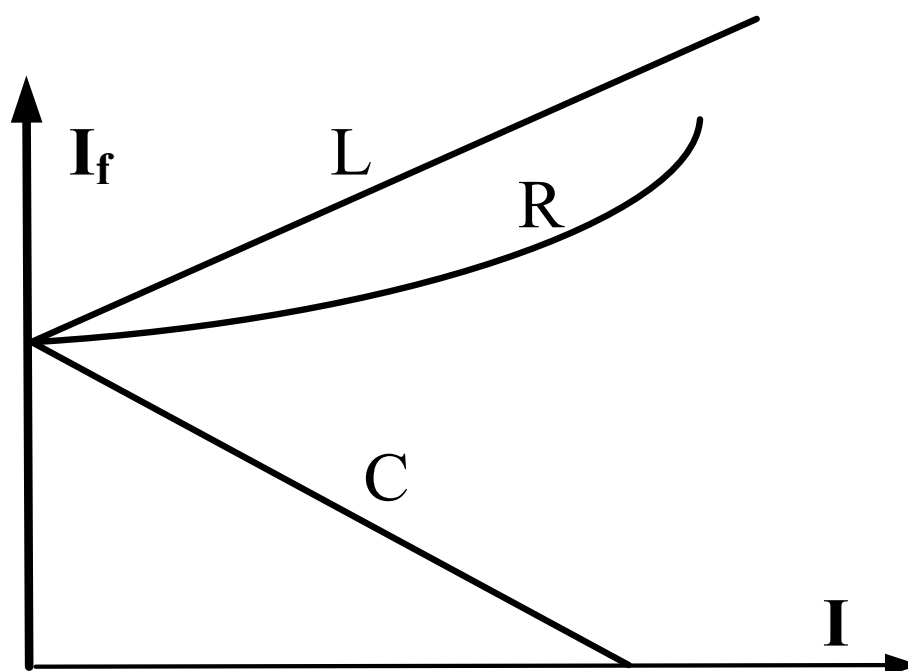


Rys. 2.17. Wykresy wskazowe generatora cylindrycznego dla różnych typów obciążeń:

a) indukcyjny, b) pojemnościowy, c) rezystancyjny

Znajomość zależności napięcia na zaciskach w funkcji prądu obciążenia jest istotna w przypadku użycia generatora dla zapewnienia zasilania przy zaniku napięcia sieci. W takim przypadku stosuje się układy automatyki, które wpływają na wartość prądu wzbudzenia, utrzymując na zaciskach stałą wartość napięcia, niezależnie od wartości prądu obciążenia. Układy takie muszą zapewnić prawidłową pracę niezależnie od charakteru obciążenia. Zależność prądu wzbudzenia od prądu twornika, przy stałej wartości napięcia na zaciskach i stałej prędkości obrotowej, nazywana jest charakterystyką regulacyjną, a jej kształt jest zależny od charakteru obciążenia i pokazany na rys. 2.18

Rzeczywisty kształt charakterystyk jest wynikiem zmian wartości indukcyjności, rezystancji lub pojemności. W takim przypadku przy obciążeniu pojemnościowym wartość maksymalna prądu występuje przy impedancji pojemnościowej równej reaktancji synchronicznej (rezonans napięć). Kształt rzeczywistych charakterystyk zewnętrznych pokazano na rys. 2.18.



Rys. 2.18. Charakterystyki regulacyjne ($U=\text{const.}$, $n=\text{const.}$) generatora synchronicznego dla różnych typów obciążeń:

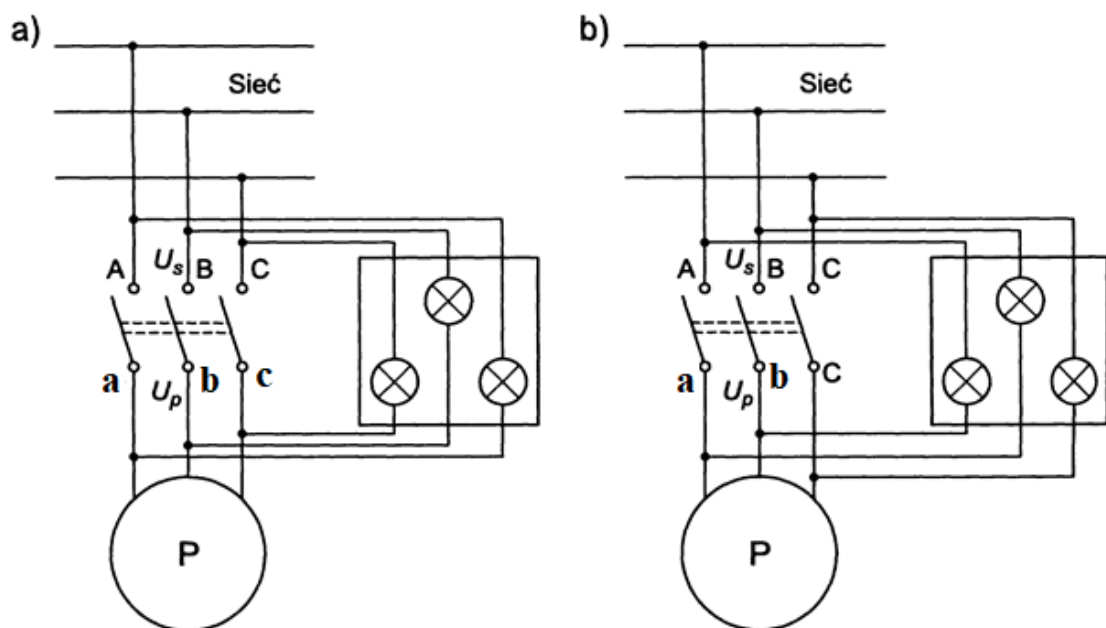
- (L) – idealny indukcyjny ($\cos \varphi = 0_{\text{ind}}$),
- (C) – idealny pojemnościowy ($\cos \varphi = 0_{\text{poj}}$),
- (R) - rezystancyjny ($\cos \varphi = 1$).

2.4. Synchronizacja generatora z siecią elektroenergetyczną

Włączenie generatora do sieci energetycznej powinno być łagodne, bez zaburzenia napięcia sieci oraz prądu sieci i generatora. Przy poprawnym załączeniu wartość napięcia sieci oraz jego częstotliwość będą stałe: $U_s = \text{const.}$, $f_s = \text{const.}$ Warunkiem idealnego załączenia jest takie jego wykonanie, by po załączeniu łącznika nie popłynął prąd. Warunkiem jest też zapewnienie identycznego przebiegu napięcia generatora i sieci w czasie. Przy założeniu, że oba napięcia mają kształt sinusoidalny, spełnione muszą być 4 warunki możliwe do identyfikacji [3][11]:

- 1) kolejność faz napięcia prądnicy (a, b, c) musi być bezwzględnie zgodna z kolejnością napięcia sieci (A, B, C),
- 2) fazy napięć prądnicy i sieci muszą być zgodne ($\alpha_s = \alpha_p$),
- 3) częstotliwości napięcia prądnicy f_p i sieci f_s powinny być identyczne ($f_s = f_p$),
- 4) wartość skuteczna napięcia prądnicy i sieci muszą być sobie równe ($U_s = U_p$).

Niespełnienie warunku pierwszego grozi uszkodzeniem prądnicy. Dopuszczalna jest niewielka tolerancja fazy, wartości skutecznej oraz częstotliwości. Zbyt duże rozbieżności mogą powodować pojawienie się dużych wartości chwilowych prądów, prowadząc do uszkodzeń generatora, stąd ważna jest ocena spełnienia wszystkich warunków przed załączeniem łącznika.



Rys. 2.19. Synchronizacja generatora synchronicznego z siecią sztywną [3]:
a) na ciemno, b) na światło wirujące.

Do tego celu służy kolumna synchronizacyjna (synchronizator). Rozwiązania takie pracują automatycznie lub półautomatycznie, wykorzystując zasady identyczne, jak to miało miejsce przy stosowaniu układów trzech żarówek przy synchronizacji nazywanej „na światło wirujące lub na ciemno” (rys. 2.19).

W przypadku synchronizacji „na ciemno” załączenie łącznika następuje w momencie wygaszenia się wszystkich trzech żarówek. Synchronizacja „na światło wirujące” polega na załączeniu łącznika w momencie, gdy nie świeci żarówka podłączona do tych samych faz sieci i generatora (C-c na rys. 2.19 b) oraz identycznego świecenia żarówek pozostałych (A-b i B-a). Kolejność czynności przy synchronizacji jest następująca:

- uruchamia się turbinę i doprowadza do prędkości bliskiej synchronicznej,
- wzbudza się generator do napięcia równego napięciu sieci,
- sprawdza się, wykorzystując synchronoskop, kolejność faz i poprzez zmianę prędkości obrotowej turbiny ustawia częstotliwość napięcia prądnicy równą częstotliwości napięcia sieci,
- na układzie synchronizującym obserwuje się kąt pomiędzy napięciem sieci a napięciem generatora i przy kącie bliskim zera zamyka się łącznik.

Jeśli różnica prędkości jest zbyt duża, prądnica może pracować asynchronicznie, a prąd i moc będzie pulsować wraz z poślizgiem. Przy odpowiednio małej różnicy prędkości prądnica synchronizuje się z siecią, lecz prędkość obrotowa wirnika będzie się „kołysać” co spowoduje pulsacje tłumione prądu i mocy, które zanikną po czasie zależnym od parametrów generatora i stopnia niedopasowania.

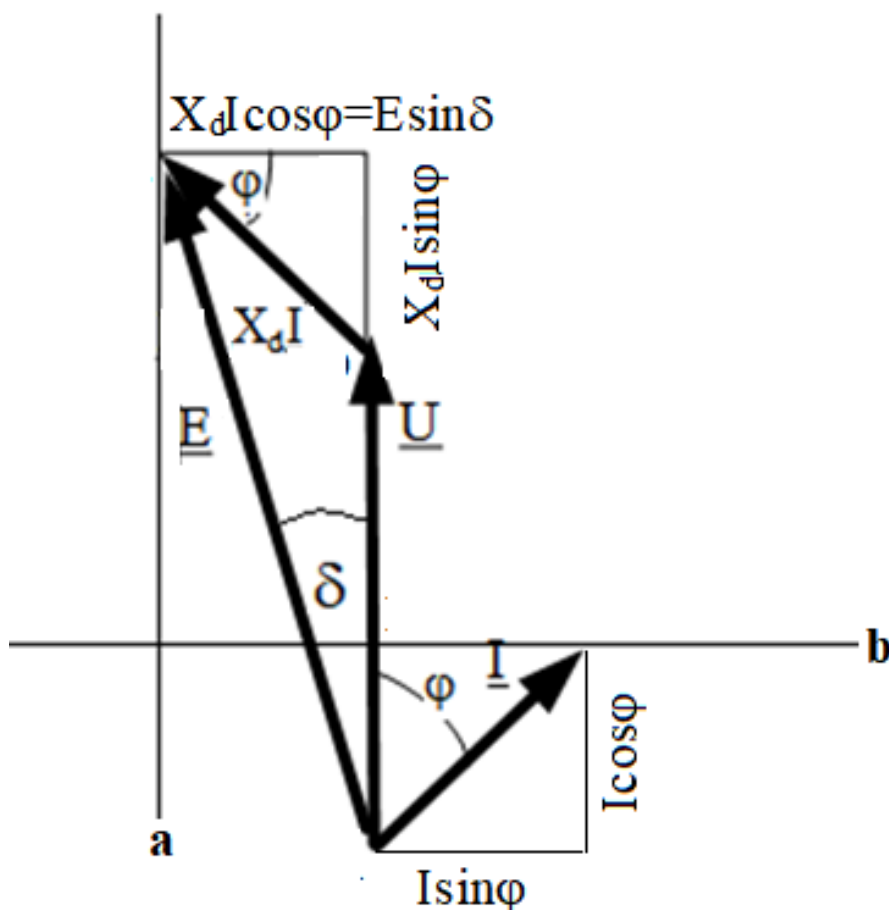
2.5. Praca maszyny synchronicznej na sieć sztywną

Po połączeniu obwodu generatora z siecią elektroenergetyczną (po synchronizacji) mamy wpływ na wartość prądu wzbudzenia oraz na wartość momentu mechanicznego podawanego na wał generatora. Generator przetwarza energię mechaniczną na energię elektryczną i wysyła ją do sieci. W przypadku pominięcia rezystancji obwodu stojana możemy narysować wykres wskazowy (rys. 2.20).

Korzystając z wykresu wskazowego, wartość mocy czynnej oddawanej do sieci możemy przedstawić zależnością (2.10), gdzie ϕ jest kątem pomiędzy prądem a napięciem na zaciskach maszyny a δ kątem obciążenia generatora (kąt pomiędzy wskazem napięcia indukowanego przez prąd wzbudzenia a wskazem napięcia na zaciskach maszyny).

$$P = 3UI \cos \phi = \frac{3UE}{X_d} \sin \delta. \quad (2.10)$$

Wartość momentu mechanicznego można wyrazić zależnością (2.11), gdzie ω_M jest prędkością mechaniczną wirnika (2.12) w rad/s, p liczbą par biegunów, f częstotliwością napięcia sieci.



Rys. 2.20. Uproszczony wykres wskazowy turbogenerators

$$M_e = \frac{P}{\omega_M}, \quad (2.11)$$

$$\omega_M = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega}{p}. \quad (2.12)$$

W praktyce stosuje się często wyrażanie prędkości obrotowej w obrotach na minutę, stąd:

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60\omega_M}{2\pi} = 9.55\omega_M, \quad (2.13)$$

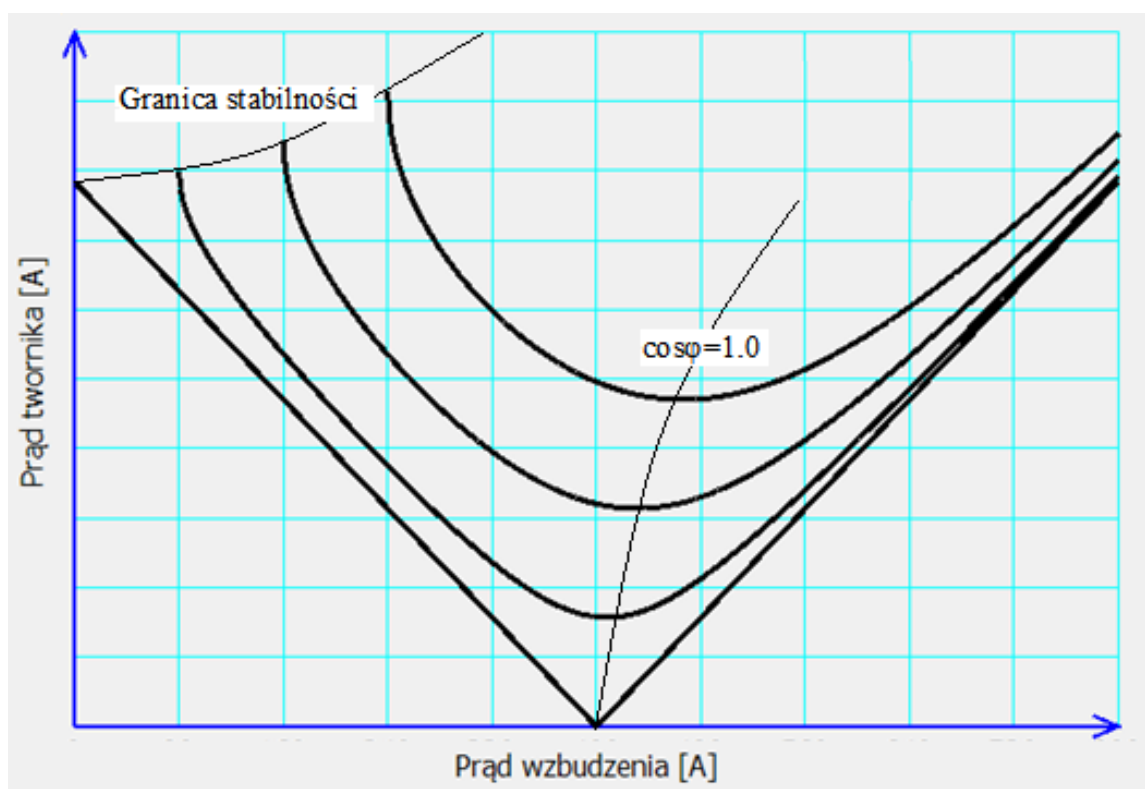
$$M_e = \frac{3UE}{\omega_M X_d} \sin \delta. \quad (2.14)$$

Przy stałej wartości momentu na wale generatora możemy zmieniać wartość prądu wzbudzenia, uzyskując przebieg zależności prądu twornika od prądu wzbudzenia przy pracy na sieć sztywną ($U=\text{const.}$, $f=\text{const.}$), (rys. 2.21). Z uwagi na kształt tej zależności przy mocy czynnej równej zero, zbliżonej do litery V, charakterystyki nazywa się krzywymi V lub krzywymi Mordey'a. Charakterystyki te wyznacza fakt, że przy stałym momencie (stałej mocy czynnej) i stałej wartości napięcia (praca na sieć elektroenergetyczną), koniec wektora siły elektromotorycznej zmienia swoją pozycję na skutek zmian prądu wzbudzenia zakreślając prostą pionową (a) na rys. 2.20 wyznaczoną przez warunek:

$$E \sin \delta = \text{const.} \quad (2.15)$$

Koniec wektora prądu przesuwają się w takim przypadku po prostej poziomej (b) spełniającej warunek:

$$I \cos \varphi = \text{const.} \quad (2.16)$$



Rys. 2.21. Krzywe V generatora synchronicznego ($U=\text{const.}$, $n=\text{const.}$) (Mordey'a) [3]

Maksymalna wartość momentu wytworzonego w stanie ustalonym przez generator występuje przy kącie obciążenia $\delta=90^\circ$. Pojawia się tu granica pracy stabilnej wyznaczona przez taką wartość kąta obciążenia. Przy przekroczeniu granicy stabilności następuje tzw. wypadnięcie generatora z synchronizmu, powodując zwiększanie się prędkości obrotowej, pojawienie się poślizgu i oscylacji w przebiegu prądu i mocy. Taki stan jest niedopuszczalny i układy regulacji automatycznej muszą w odpowiedni sposób reagować na zmiany

obciążenia, przede wszystkim przy niedowzbudzeniu, czyli pracy generatora wysyłającego do sieci moc bierną o charakterze pojemnościowym. W przypadku maszyn synchronicznych mamy możliwość regulacji współczynnika mocy poprzez regulację prądu wzbudzenia. Umożliwia to pracę maszyny jako kompensatora mocy biernej oraz pracę maszyny (jako generatora lub silnika) przy współczynniku mocy równym jedności.

Moment znamionowy maszyny cylindrycznej można wyrazić wzorem:

$$M_n = \frac{3U_n E_n}{X_d \omega_M} \sin \delta_n. \quad (2.17)$$

Wartość maksymalna momentu występuje przy kącie obciążenia równym 90° przy znamionowym napięciu oraz znamionowej wartości prądu wzbudzenia jest równa:

$$M_k = \frac{3U_n E_n}{X_d \omega_M}. \quad (2.18)$$

Stąd przeciążalność statyczną jako iloraz wartości maksymalnej momentu do wielkości znamionowej można przedstawić zależnością (2.19):

$$u = \frac{M_k}{M_n} = \frac{1}{\sin \delta_n}. \quad (2.19)$$

Moment znamionowy można także wyrazić wzorem (2.20):

$$M_n = \frac{1}{\omega_M} P_n = \frac{1}{\omega_M} m U_n I_n \cos \phi_n. \quad (2.20)$$

Stąd otrzymamy:

$$u = \frac{M_k}{M_n} = \frac{E_n}{X_d I_n \cos \phi_n}, \quad (2.21)$$

$$\frac{E_n}{X_d} = I_{zn}, \quad (2.22)$$

$$u = \frac{I_{zn}}{I_n \cos \phi_n} = \frac{I_{fn}}{I_{fn} \cos \phi_n}. \quad (2.23)$$

Ze wzoru na stosunek zwarcia:

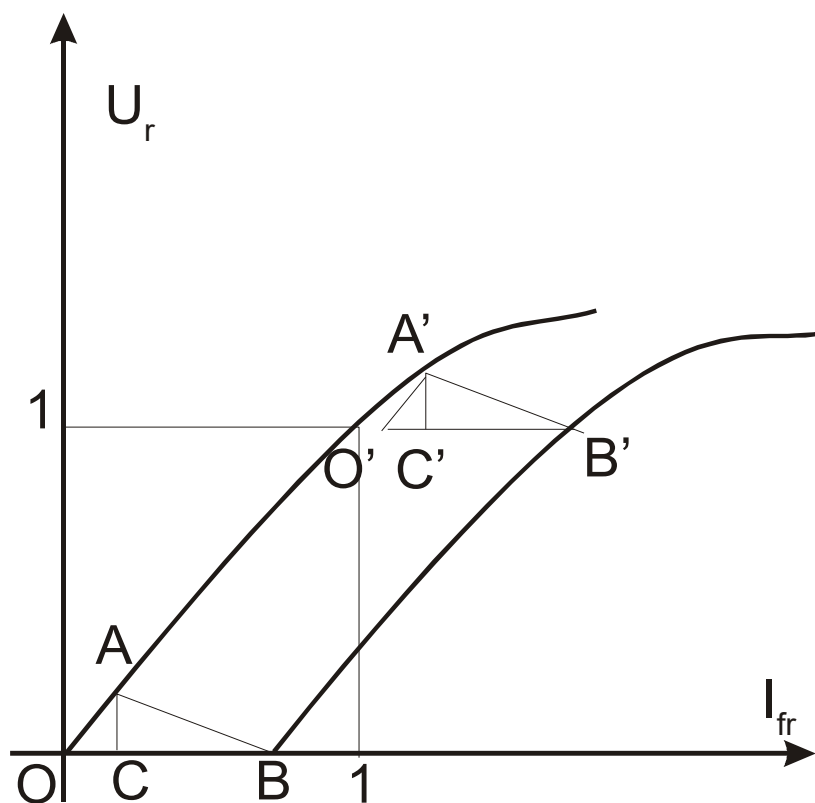
$$I_{fzn} = \frac{I_{fon}}{K_z}, \quad (2.24)$$

$$u = K_z \frac{I_{fn}}{I_{fon} \cos \phi_n}. \quad (2.25)$$

Przeciążalność statyczna jest odwrotnie proporcjonalna do znamionowego współczynnika mocy oraz proporcjonalna do stosunku zwarcia. W celu uzyskania odpowiedniej wartości przeciążalności możemy zwiększyć stosunek zwarcia poprzez zwiększenie szczeliny powietrznej (zmniejszenie reaktancji twornika). Z tej przyczyny grubość szczeliny powietrznej maszyn synchronicznych jest znacznie większa niż w maszynach asynchronicznych o podobnych mocach i prędkościach obrotowych.

2.6. Reaktancja Potiera

W przypadku generatorów dużej mocy nie jest możliwe doświadczalne wyznaczenie wszystkich wartości znamionowych maszyny synchronicznej. W celu oszacowania wartości znamionowego prądu wzbudzenia oraz zmienności napięcia konieczne jest wyznaczenie reaktancji rozproszenia oraz oszacowanie pola magnetycznego wytworzonego przez znamionowy prąd twornika (reakcja twornika) w skali prądu magnesującego.



Rys. 2.22. Wyznaczenie reaktancji Potiera w generatorze synchronicznym

W tym celu wykorzystuje się fakt nasycenia obwodu magnetycznego w warunkach pracy znamionowej na podstawie charakterystyk biegu jałowego, zwarcia oraz doświadczalnego wyznaczenia wartości prądu magnesującego przy obciążeniu generatora o charakterze czysto indukcyjnym. Charakterystyka obciążenia maszyny jest to zależność napięcia na jego zaciskach od prądu wzbudzenia, przy stałej wartości prądu twornika, stałej wartości współczynnika mocy oraz stałej prędkości obrotowej. W przypadku obciążenia o charakterze indukcyjnym kształt charakterystyki obciążenia można określić na podstawie znajomości reaktancji rozproszenia oraz wartości reakcji twornika w skali prądu wzbudzenia (tzw. trójkąt Potiera OAB na rys. 2.22) przy znamionowej wartości prądu twornika. Z uwagi na fakt rozmagnesowującego oddziaływania twornika w osi podłużnej charakterystykę obciążenia można wyznaczyć, przesuwając równolegle trójkąt Potiera oraz utrzymując wierzchołek A na charakterystyce biegu jałowego.

W rzeczywistości nie znamy wartości reaktancji rozproszenia ani informacji o wartości reakcji twornika. Pierwszą czynnością, jaką można wykonać, jest zatem uzyskanie wymaganych informacji poprzez graficzne wyznaczenie trójkąta Potiera $O'A'B'$). W tym celu kolejno wykonuje się próbę biegu jałowego oraz zwarcia. Z próby zwarcia wyznacza się wartość znamionowego prądu wzbudzenia przy zwarcu (odcinek OA). Wykorzystując fakt, iż maszyna pracuje w warunkach znamionowych przy istnieniu nasycenia obwodu magnetycznego, wykonuje się jeden pomiar punktu B' przy pracy na sieć sztywną i znamionowej wartości napięcia generatora, znamionowej wartości prądu twornika oraz pracy o charakterze czysto indukcyjnym (przewzbudzenie po idealnej synchronizacji). Równolegle do osi prądu wzbudzenia wyznacza się punkt O' przy odcinkach OB i $O'B'$ równych sobie. Następnie równolegle do początkowej części charakterystyki biegu jałowego rysuje się prostą przechodzącą przez punkt O' . Prosta ta przecina charakterystykę biegu jałowego w punkcie A' . Tak uzyskuje się kształt trójkąta Potiera, gdzie jego wysokość $A'C''$ jest wartością spadku napięcia na reaktancji rozproszenia, a odcinek $O'C'$ odpowiada wartości reakcji twornika. Odcinek $O'C'$ odpowiada przepływowi wypadkowemu. Z uwagi na fakt, iż wartość punktu B' nie jest określona przy takiej samej wartości prądu wzbudzenia jak w punkcie O' , tak uzyskana wartość reaktancji rozproszenia jest nieco mniejsza (z uwagi na różny stan nasycenia obwodu magnetycznego wirnika) - taką wartość nazywamy reaktancją Potiera.

2.7. Wykres Potiera

Trójkąt Potier'a jest niezbędny do wyznaczanie znamionowego prądu wzbudzenia i zmienności napięcia generatora synchronicznego. W tym celu można posłużyć się wykresem, pokazanym na rys. 2.23, nazywanym wykresem Potiera. W tym celu rysujemy fragment wykresu wskazowego przy pracy znamionowej, tzn. rysujemy wektor napięcia na zaciskach oraz wektor prądu twornika pod kątem ϕ wyznaczonym przez znamionowy współczynnik mocy.

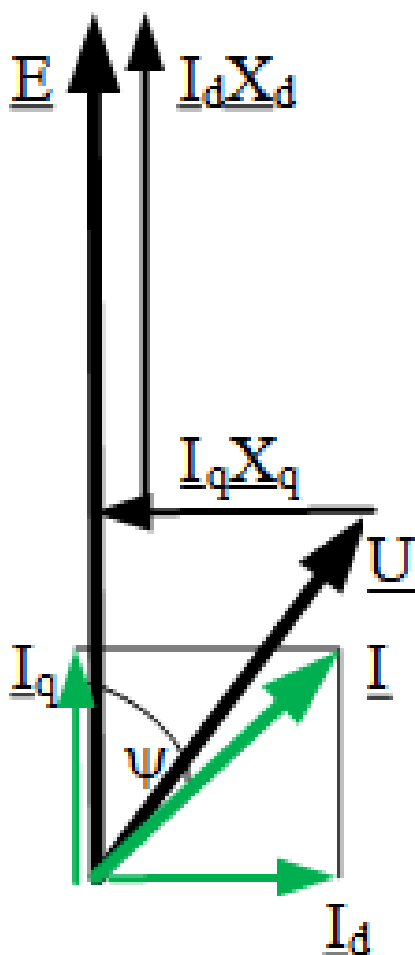
W warunkach pracy znamionowej maszyna pracuje przy nasyconym obwodzie magnetycznym, stąd konieczne jest wyznaczenie napięcia szczelinowego, związanego z wypadkowym polem magnetycznym wyznaczającym stan nasycenia obwodu magnetycznego. W tym celu pod kątem prostym do wektora prądu rysujemy wektor spadku napięcia na reaktancji Potiera. Suma tego wektora i wektora napięcia na zaciskach wyznacza

str. 77

Wobec zależności punktu pracy generatora synchronicznego od stanu nasycenia obwodu magnetycznego w praktyce stosuje się modyfikacje wykresu Potiera, nazywane wykresem szwedzkim i amerykańskim.

2.8. Maszyna synchroniczna jawnobiegunowa (hydrogenerator)

Z uwagi na nierównomierną szczelinę powietrzną w hydrogeneratorach (maszynach jawnobiegunowych) analiza pracy musi uwzględniać kierunek, w jakim powstaje pole reakcji twornika. W zależności od obciążenia wartość strumienia reakcji twornika jest zależna od grubości szczeliny powietrznej.



Rys. 2.24. Wykres wskazowy maszyny jawnobiegunowej

W stanie ustalonym stosuje się analizę polegającą na rozdzieleniu składników pola magnetycznego oraz wielkości pochodnych na pozycje wyznaczone przez położenie osi podłużnej d i poprzecznej q . Oś podłużna wyznaczona jest przez kierunek pola magnetycznego wytworzonego przez prąd wzbudzenia. W tej osi grubość szczeliny powietrznej jest najmniejsza, co skutkuje największą wartością reaktancji twornika wraz z reaktancją rozproszenia $X_d = X_{ad} + X_r$. Wartość reaktancji twornika jest najmniejsza w sytuacji, gdy pole magnetyczne związane z reakcją twornika i reaktancją rozproszenia $X_q = X_{ar} + X_r$ wytwarzane jest pod kątem prostym do osi d . Wielkości związane z osią poprzeczną są to wielkości, które na wykresie wskazowym są zgodne z wartością siły

elektromotorycznej $\underline{E}$. Pod kątem prostym do wektora $\underline{E}$ występują wielkości związane z polem strumienia głównego, czyli z osią podłużną d .

W związku z faktem, że w osi podłużnej występuje pole magnetyczne wynikające zarówno z prądu wzbudzenia, jak i reakcji twornika, natomiast w osi poprzecznej występuje tylko napięcie indukowane na skutek reakcji twornika, możemy stwierdzić, że suma napięcia na zaciskach generatora i spadku napięcia od prądów w osi d i q (rys. 2.24) jest wartością siły elektromotorycznej:

$$\underline{E} = \underline{U} + R\underline{I} + jX_q\underline{I}_q + jX_d\underline{I}_d. \quad (2.27)$$

Znajomość kąta pomiędzy wektorem siły elektromotorycznej $\underline{E}$ oraz prądem $\underline{I}$ umożliwia wyznaczenie składników I_d oraz I_q :

$$I_d = I \sin \psi, \quad (2.28)$$

$$I_q = I \cos \psi. \quad (2.29)$$

W praktyce możemy zmierzyć wartości napięcia na zaciskach, prądu twornika oraz mocy oddawanej przez generator (rys. 2.25). Równanie (2.27) można przekształcić do postaci (2.30):

$$\underline{E} = \underline{U} + R\underline{I} + jX_q\underline{I} + j(X_d - X_q)\underline{I}_d. \quad (2.30)$$

Na ich podstawie, korzystając z postaci równania (2.30) można wyznaczyć położenie wektora siły elektromotorycznej (położenie osi q) jako prostej wyznaczonej przez sumę wektora napięcia $\underline{U}$ oraz spadku napięcia od prądu stojana na reaktancji poprzecznej $X_q I$ pod kątem prostym do wektora prądu.

Wartość siły elektromotorycznej należy uzupełnić o odcinek napięcia wynikający z różnej wartości reaktancji podłużnej i poprzecznej:

$$\underline{I}_d(X_d - X_q). \quad (2.31)$$

Przy pominięciu rezystancji twornika – dla dużych maszyn synchronicznych założenie to jest bardzo dokładne, tzn. przy założeniu, że sprawność maszyny jest równa 100%, moc mechaniczna jest równa mocy oddanej od strony obwodu elektrycznego, wówczas dla maszyny jawnobiegunowej poprawne są zależności (2.32) i (2.33).

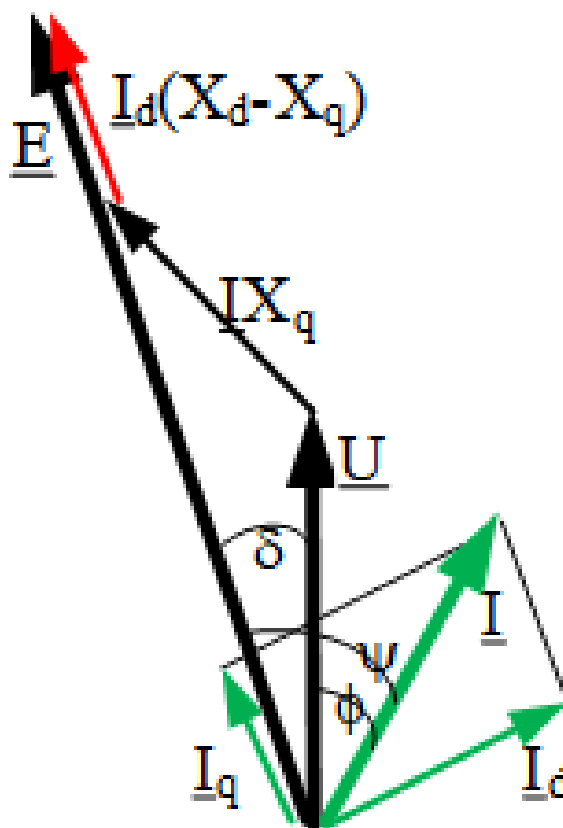
$$E = U \cos \delta + X_d I_d, \quad (2.32)$$

$$U \sin \delta = X_q I_q. \quad (2.33)$$

Wartości poszczególnych składników prądu twornika można przedstawić w postaci zależności (2.34) oraz (2.35).

$$I_d = \frac{E}{X_d} - \frac{U}{X_d} \cos \delta, \quad (2.34)$$

$$I_q = \frac{U}{X_q} \sin \delta. \quad (2.35)$$



Rys. 2.25. Praktyczny sposób rysowania wykresu wskazowego maszyny jawnobiegunowej

Moc oddawaną do sieci przez trójfazowy generator jawnobiegunowy można opisać zależnością (2.36).

$$P = 3UI \cos \phi = 3UI \cos(\psi - \delta), \quad (2.36)$$

Po przekształceniach otrzymamy:

$$P = 3U(I \cos \psi \cos \delta + I \sin \psi \sin \delta), \quad (2.37)$$

$$P = 3U(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta), \quad (2.38)$$

$$P = 3U\left(\frac{U}{X_q} \sin \delta \cos \delta + \left(\frac{E}{X_d} - \frac{U}{X_d} \cos \delta\right) \sin \delta\right), \quad (2.39)$$

$$P = 3U \frac{E}{X_d} \sin \delta + 3 \sin \delta \cos \delta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right), \quad (2.40)$$

$$P = 3U \frac{E}{X_d} \sin \delta + \frac{3U^2}{2} \sin 2\delta \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right). \quad (2.41)$$

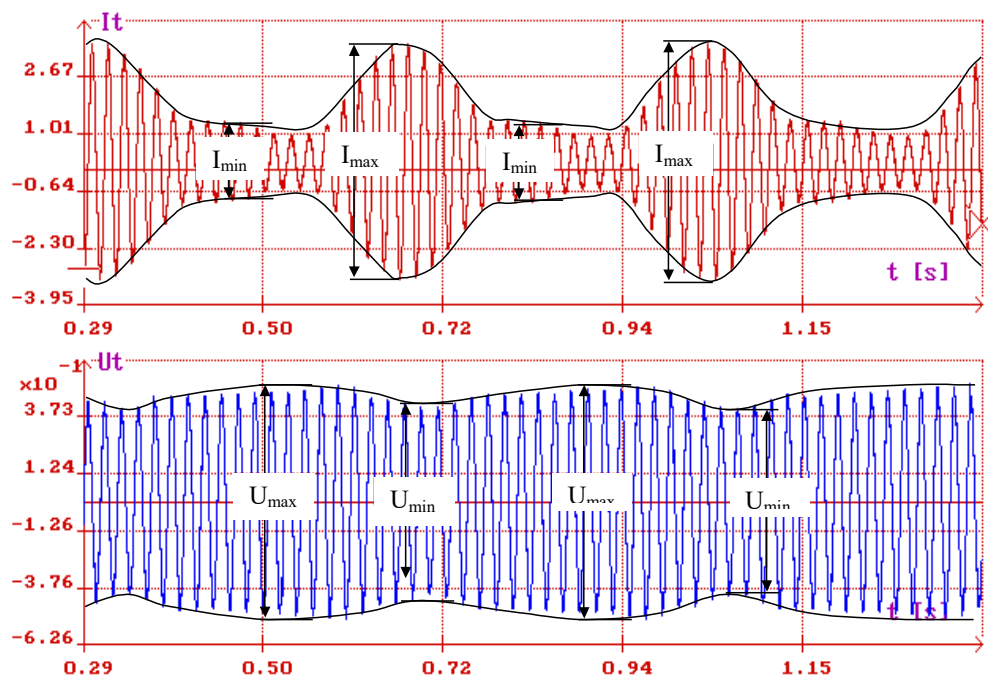
Moment na wale generatora (przy pominięciu strat mocy) można zatem przedstawić w postaci zależności (2.42).

$$M = \frac{3UE}{X_d \omega_M} \sin \delta + \frac{3U^2}{\omega_M^2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta. \quad (2.42)$$

Wartość momentu ma tu dwa składniki nazywane momentem elektromagnetycznym wynikającym ze współdziałania pola magnetycznego wirnika i reakcji twornika oraz momentem reluktancyjnym, wynikającym z nierównomiernej szczeliny powietrznej pomiędzy obwodem magnetycznym stojana i wirnika.

2.9. Próba małego poślizgu

Analiza pracy maszyn jawnobiegunowych wymaga znajomości wartości reaktancji synchronicznych podłużnej i poprzecznej. Ich wartość można uzyskać, wykonując tzw. próbę małego poślizgu. Próba polega na wymuszeniu ruchu obrotowego maszyny z prędkością nieznacznie różniącą się od prędkości synchronicznej oraz na zasileniu uzwojeń twornika trójfazowym napięciem symetrycznym o obniżonej wartości. Napięcia te spowodują przepływ prądu wytwarzającego wirujące pole. Obniżona wartość związana jest z ograniczeniem wartości prądu twornika. W przypadku zgodnego kierunku wirowania pola magnetycznego oraz wirnika wartość prądu płynącego przez uzwojenia będzie zależna od aktualnego położenia pola reakcji twornika w stosunku do osi wirnika. W przypadku położenia zgodnego z osią podłużną do wytworzenia siły elektromotorycznej potrzeba jest mniejsza wartość prądu.



Rys. 2.26. Wartości chwilowe prądu i napięcia przy próbie małego poślizgu – wyniki pomiarów

Przy małej wartości poślizgu wskazania pomiaru prądu będą oscylowały z częstotliwością zależną od poślizgu, a pomiar wartości ekstremalnych umożliwi szacowanie reaktancji podłużnej i poprzecznej zgodnie z zależnościami (2.43) i (2.44):

$$X_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}I_{min}}, \quad (2.43)$$

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3}I_{max}}. \quad (2.44)$$

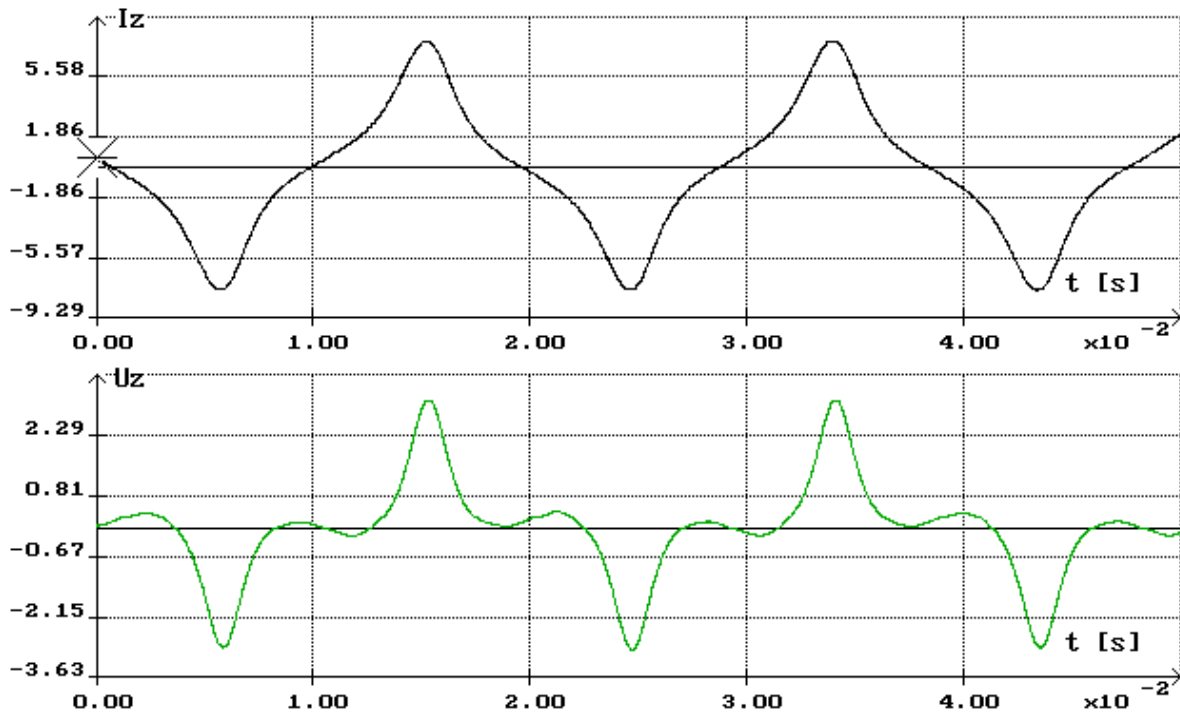
Podane zależności wynikają z faktu pomiaru wartości międzyfazowego napięcia oraz prąd fazowego generatora.

2.10. Obciążenie niesymetryczne generatora synchronicznego

Większość generatorów synchronicznych pracujących w sieci elektroenergetycznej powinna pracować przy obciążeniu symetrycznym. Związane jest to z problemami, jakie występują w maszynach synchronicznych w przypadku pojawienia się składnika pola magnetycznego wirującego przeciwnie do kierunku obrotu wału wirnika. Składnik taki powoduje zaindukowanie się napięć w klatce rozruchowo-tłumiącej lub w litym materiale rdzenia maszyny jawnobiegunowej. W takiej sytuacji w zwartym uzwojeniu klatki zaczyna płynąć prąd o dużej wartości, podobnie jak w maszynie asynchronicznej pracującej z poślizgiem równym 2. Poza wartością prądu klatki pojawia się składnik prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Składnik ten, o podwójnej częstotliwości sieci, wytwarza względem wirnika pole pulsujące, które można rozłożyć na dwa składniki względem wirującego wirnika: składową wirującą zgodnie i przeciwnie. Składnik przeciwny wytwarza pole magnetyczne, które obraca się z potrójną prędkością synchroniczną względem uzwojeń stojana. Składnik ten powoduje przepływ prądu 3 harmonicznej w tworniku. Z uwagi na fakt, że dla takiej częstotliwości sieć stanowi obwód zwarty, w trzech uzwojeniach stojana płyną prądy o dużych wartościach.

Składnik pola przeciwbieżnego pojawia się w maszynie na skutek niesymetrii obciążenia, które w skrajnym przypadku dotyczy zwarcia dwu- lub jednofazowego. Rys. 2.27 pokazuje przebiegi prądu zwarcia dwufazowego oraz napięcia w fazie odłączonej dla przypadku zwarcia dwufazowego. Wyraźnie widoczne są tu składniki o potrójnej częstotliwości.

W stanie ustalonym można opisać pracę maszyny, korzystając z metody składowych symetrycznych. Rzeczywiste wartości prądów i napięć można rozłożyć na składowe symetryczne (zgodną 1, przeciwną 2 i zerową 0), korzystając z zależności (2.45) i (2.46).



Rys. 2.27. Przebiegi prądu zwarcia dwufazowego i napięcia w fazie odłączonej

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W}_A \\ \underline{W}_B \\ \underline{W}_C \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{W}_A \\ \underline{W}_B \\ \underline{W}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{W}_0 \\ \underline{W}_1 \\ \underline{W}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

gdzie:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ}. \quad (2.47)$$

a wielkości oznaczone literą W oznaczają kolejno wartości prądów i napięć dla wielkości fazowych A, B i C lub składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej z indeksami 1, 2, 0. Zgodnie z tymi zależnościami, w przypadku zwarcia jednofazowego, możemy napisać:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \frac{1}{3} \underline{I}_u = \frac{1}{3} \underline{I}_{if}, \quad (2.48)$$

$$\underline{E}_{i0} = \underline{E}_{i2} = 0 \quad \underline{E}_{i1} = \underline{E}_{if}. \quad (2.49)$$

Siły elektromotoryczne indukowane mają tylko składową zgodną, natomiast napięcie wypadkowe w fazie A jest równe zeru:

$$\underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = 0. \quad (2.50)$$

Równania maszyny w składowych symetrycznych przyjmują postać:

$$0 = \underline{U}_0 + \underline{Z}_0 \underline{I}_0, \quad (2.51)$$

$$\underline{U}_{i1} = \underline{U}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1, \quad (2.52)$$

$$0 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2, \quad (2.53)$$

$$\underline{U}_{i1} = \underline{U}_1 + \underline{U}_0 + \underline{U}_2 + \underline{Z}_2 \underline{I}_0 + \underline{Z}_1 \underline{I}_0 + \underline{Z}_0 \underline{I}_0, \quad (2.54)$$

$$\underline{U}_{i1} = \underline{Z}_2 \underline{I}_0 + \underline{Z}_1 \underline{I}_0 + \underline{Z}_0 \underline{I}_0, \quad (2.55)$$

$$\underline{U}_{i1} = (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_0) \underline{I}_0, \quad (2.56)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{i1}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}. \quad (2.57)$$

Przy czym $\underline{Z}_1$ oznacza impedancję generatora dla składowej zgodnej, $\underline{Z}_2$ dla przeciwnej oraz $\underline{Z}_0$ dla składowej zerowej. Prąd zwarcia jednofazowego jest zatem równy:

$$\underline{I}_{ZI} = \frac{3\underline{U}_{i1}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_0}. \quad (2.58)$$

Pomijając rezystancje dla poszczególnych składowych możemy przyjąć, że impedancje są równe reaktancjom dla odpowiednich składowych. Reaktancja dla składowej zerowej jest związana praktycznie ze strumieniem rozproszenia, stąd:

$$X_1 \gg X_0. \quad (2.59)$$

Reaktancja dla składowej przeciwnej związana jest ze strumieniem reakcji twornika dla poślizgu równego 2 i ze strumieniem rozproszenia, stąd:

$$X_1 \gg X_2. \quad (2.60)$$

Przyjmując dla uproszczenia, że:

$$X_0 = X_2 \approx 0. \quad (2.61)$$

To otrzymamy, że prąd ustalony przy zwarcu jednofazowym będzie miał wartość:

$$\underline{I}_Z = \frac{3\underline{U}_{i1}}{jX_{11}}. \quad (2.62)$$

Dla zwarcia dwufazowego możemy przeprowadzić podobne rozumowanie. Otrzymamy:

$$\underline{I}_{ZII} = \frac{\sqrt{3}\underline{U}_{i1}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}. \quad (2.63)$$

Wobec faktu, że prąd zwarcia symetrycznego (3-fazowego) jest równy:

$$\underline{I}_Z = \frac{\underline{U}_{i1}}{jX_{11}}. \quad (2.64)$$

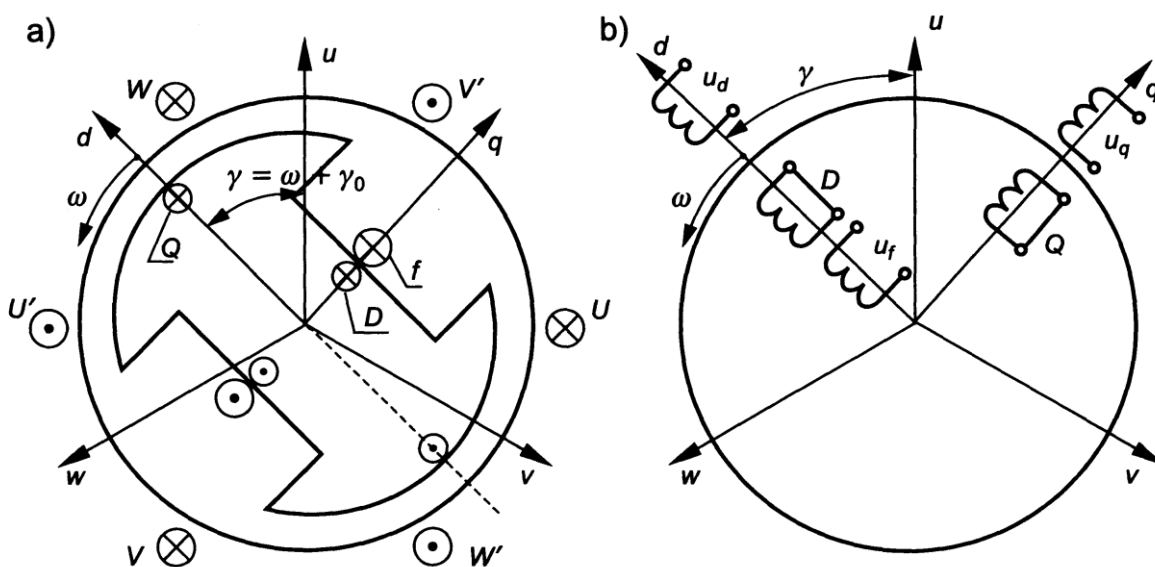
Proporcje pomiędzy prądami zwarcia 3-fazowego, 2-fazowego i 1-fazowego są równe:

$$\underline{I}_Z : \underline{I}_{ZII} : \underline{I}_{ZI} = 1 : \sqrt{3} : 3. \quad (2.65)$$

Przy takiej samej wartości prądu wzbudzenia prąd zwarcia jednofazowego jest do 3 razy większy niż przy zwarcu symetrycznym.

2.11. Wprowadzenie do dynamiki maszyn synchronicznych

Równania dynamiki maszyny można opisać jako związki pomiędzy strumieniami skojarzonymi z poszczególnymi uzwojeniami oraz z równaniami Kirchhoffa dla poszczególnych obwodów w maszynie [1]. Na rys. 2.28 pokazano zastępcze obwody maszyny synchronicznej. Rys. 2.28a pokazuje schematycznie wzajemne położenie uzwojeń w stanie (trzy fazy przesunięte względem siebie o kąt 120° elektrycznych), obwód wzbudzenia oraz zastępczy dwufazowy obwód klatki rozruchowo tłumiącej (rys. 2.28b).



Rys. 2.28. Zastępcze obwody generatora synchronicznego [1]

Równania strumieniowo-prądowe wiążą ze sobą wartości napięć indukowanych w poszczególnych uzwojeniach na skutek zmian strumieni skojarzonych w czasie oraz napięć na zaciskach i spadków napięć na rezystancjach poszczególnych obwodów [1]:

$$\frac{d\Psi_u}{dt} + Ri_u + u_u = 0, \quad (2.66)$$

$$\frac{d\Psi_v}{dt} + Ri_v + u_v = 0, \quad (2.67)$$

$$\frac{d\Psi_w}{dt} + Ri_w + u_w = 0, \quad (2.68)$$

$$\frac{d\Psi_f}{dt} + Ri_f + u_f = 0, \quad (2.69)$$

$$\frac{d\Psi_D}{dt} + Ri_D = 0, \quad (2.70)$$

$$\frac{d\Psi_Q}{dt} + Ri_Q = 0, \quad (2.71)$$

gdzie:

Ψ_u, Ψ_v, Ψ_w – strumienie skojarzone z uzwojeniami fazowymi stojana,

i_u, i_v, i_w – wartości chwilowe prądów fazowych stojana,

u_u, u_v, u_w – wartości chwilowe napięć fazowych stojana,

Ψ_f, i_f, u_f – strumień skojarzony, wartość chwilowa prądu oraz napięcie uzwojenia wzbudzenia,

Ψ_Q, i_Q, Ψ_D, i_D – strumienie skojarzone oraz wartości chwilowe prądów w obwodach wirnika reprezentujących klatkę rozruchowo – tłumiącą.

Równania (2.66)-(2.70) można zapisać w postaci macierzowej:

$$\frac{d[\Psi]}{dt} + [R][i] + [u] = 0, \quad (2.72)$$

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \Psi_u \\ \Psi_v \\ \Psi_w \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix}, \quad (2.73)$$

$$[i] = \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad (2.74)$$

$$[u] = \begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \\ -u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.75)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix}. \quad (2.76)$$

W równaniach przyjęto równość rezystancji w trzech fazach uzwojenia stojana. Wartości strumieni skojarzonych z poszczególnymi uzwojeniami można zapisać w postaci macierzowej jako:

$$[\Psi] = [L][i], \quad (2.77)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_u & M_{uv} & M_{uw} & M_{uf} & M_{uD} & M_{uQ} \\ M_{uv} & L_v & M_{vw} & M_{vf} & M_{vD} & M_{vQ} \\ M_{uw} & M_{vw} & L_w & M_{wf} & M_{wD} & M_{wQ} \\ M_{uf} & M_{vf} & M_{wf} & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{uD} & M_{vD} & M_{wD} & M_{fD} & L_D & 0 \\ M_{uQ} & M_{vQ} & M_{wQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}. \quad (2.78)$$

Wartości indukcyjności w macierzy $[L]$ możemy określić, wyznaczając rozkład pola magnetycznego wzbudzonego pojedynczymi prądami w uzwojeniach i obliczając wartość strumieni skojarzonych z poszczególnymi uzwojeniami. W ogólnym przypadku w maszynie synchronicznej występuje nierównomierna szczelina powietrzna, co skutkuje zmianą wartości indukcji własnych i wzajemnych w obrębie stojana, jak i indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika. Wartość indukcyjności własnej uzwojeń stojana (rys. 2.29) L_u , L_v , i L_w można na przykład rozłożyć na szereg harmonicznym [8] [11]:

$$L_u = l_0 + l_2 \cos 2\gamma + l_4 \cos 4\gamma + \dots \quad (2.79)$$

Z dostateczną dokładnością możemy ograniczyć się do dwóch pierwszych wyrazów szeregu, wówczas:

$$L_u = l_0 + l_2 \cos 2\gamma, \quad (2.80)$$

$$L_d = l_0 + l_2, \quad (2.81)$$

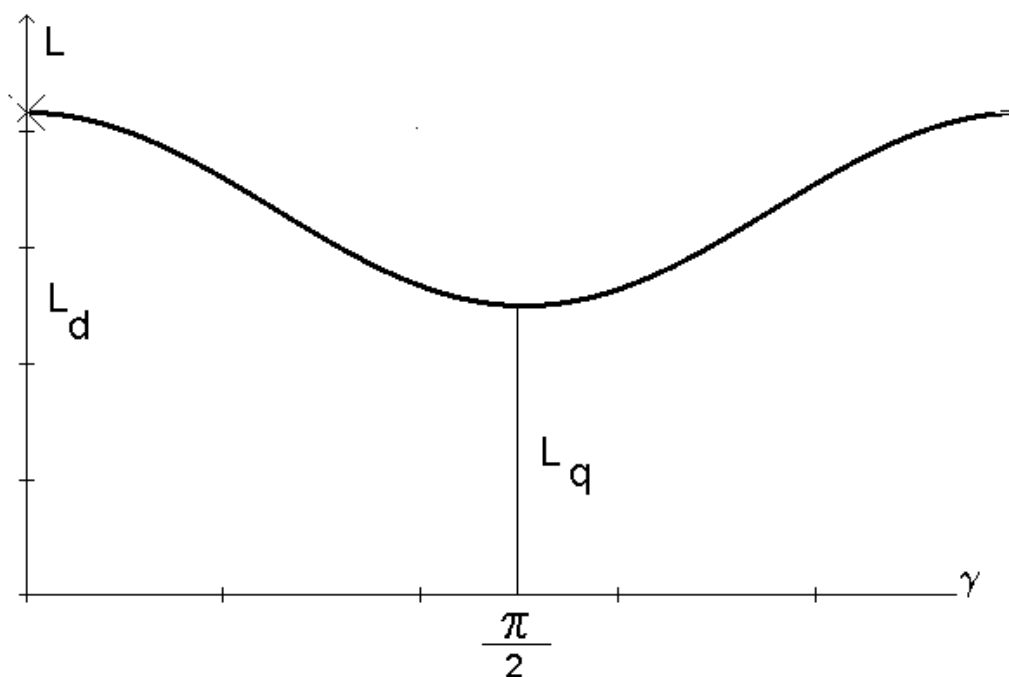
$$L_q = l_0 - l_2. \quad (2.82)$$

Jeśli oznaczymy wartość maksymalną indukcyjności L_u jako l_d , a wartość minimalną jako l_q (zależności (2.81) i (2.82)) oraz uwzględnimy przesunięcie uzwojeń stojana na obwodzie maszyny o kąt 120° , otrzymamy:

$$L_u = \frac{l_d + l_q}{2} + \frac{l_d - l_q}{2} \cos 2\gamma, \quad (2.83)$$

$$L_v = \frac{l_d + l_q}{2} + \frac{l_d - l_q}{2} \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.84)$$

$$L_w = \frac{l_d + l_q}{2} + \frac{l_d - l_q}{2} \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right). \quad (2.85)$$



Rys. 2.29. Zależność indukcyjności własnej uzwojenia stojana w zależności od kąta położenia wału wirnika

Podobne efekty uzyskamy w przypadku analizy indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniami stojana. Otrzymamy:

$$M_{uv} = -\frac{m_d+m_q}{2} + \frac{m_d-m_q}{2} \cos(2\gamma + \frac{\pi}{3}), \quad (2.86)$$

$$M_{uw} = -\frac{m_d+m_q}{2} + \frac{m_d-m_q}{2} \cos(2\gamma - \pi), \quad (2.87)$$

$$M_{vw} = -\frac{m_d+m_q}{2} + \frac{m_d-m_q}{2} \cos(2\gamma - \frac{\pi}{3}). \quad (2.88)$$

Wartości indukcyjności własnych obwodów wirnika (uzwojenia wzbudzenia z indeksem f oraz obwodów reprezentujących klatkę rozruchowo-tłumiącą oznaczonych indeksami D, Q) są wartościami stałymi, a indukcyjności wzajemne pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika, kolejno uzwojeń stojana (oznaczonych indeksami u, v, w) oraz uzwojeń wirnika, zależą od położenia wału maszyny:

$$M_{uf} = M_{df} \cos \gamma, \quad (2.89)$$

$$M_{vf} = M_{df} \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}), \quad (2.90)$$

$$M_{wf} = M_{df} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}), \quad (2.91)$$

$$M_{uD} = M_{dD} \cos \gamma, \quad (2.92)$$

$$M_{vD} = M_{dD} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.93)$$

$$M_{wD} = M_{dD} \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.94)$$

$$M_{uQ} = M_{qQ} \sin \gamma, \quad (2.95)$$

$$M_{vQ} = M_{qQ} \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.96)$$

$$M_{wQ} = M_{qQ} \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (2.97)$$

Indukcyjność wzajemna pomiędzy uzwojeniem wzbudzenia f oraz uzwojeniem D jest także wartością stałą (M_{fd}).

W praktyce stosuje się przekształcenia układu równań do postaci wektorowej [1][8]. Dla analizowanej postaci równań jest to równoznaczne z lewostronnym mnożeniem równań przez macierz wynikającą z transformacji Edyty Clark [1][11][13] w postaci:

$$[S] = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.98)$$

W wyniku otrzymamy:

$$\frac{d[S][\Psi]}{dt} + [S][R][S]^{-1}[S][i] + [S][u] = 0, \quad (2.99)$$

$$\frac{d[\Psi_{\alpha\beta}]}{dt} + [R][i_{\alpha\beta}] + [u_{\alpha\beta}] = 0. \quad (2.100)$$

a poszczególne macierze przyjmą postać:

$$[\Psi_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \Psi_{\alpha} \\ \Psi_{\beta} \\ \Psi_0 \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix}, \quad (2.101)$$

$$[i_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad (2.102)$$

$$[u_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \\ u_0 \\ -u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.103)$$

$$[\Psi_{\alpha\beta}] = [L_{\alpha\beta}][i_{\alpha\beta}], \quad (2.104)$$

$$[L_{\alpha\beta}] = [S][L][S]^{-1}, \quad (2.105)$$

$$[L_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} L_{\alpha} & M_{\alpha\beta} & 0 & M_{\alpha f} & M_{\alpha D} & M_{\alpha Q} \\ M_{\alpha\beta} & L_{\beta} & 0 & M_{\beta f} & M_{\beta D} & M_{\beta Q} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 3/2 M_{\alpha f} & 3/2 M_{\beta f} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ 3/2 M_{\alpha D} & 3/2 M_{\beta D} & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 3/2 M_{\alpha Q} & 3/2 M_{\beta Q} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}, \quad (2.106)$$

Wartości indukcyjności własnych w osiach alfa-beta oraz indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniami stojana i wirnika są zależne od położenia wału wirnika. Przyjmując używane w literaturze uproszczenia, możemy napisać, że wartości poszczególnych indukcyjności są równe:

$$L_{\alpha} = \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\gamma. \quad (2.107)$$

gdzie wartość indukcyjności własnej zależy od położenia wirnika oraz L_d jest wartością maksymalną indukcyjności własnej stojana po transformacji do układu alfa-beta, L_q - wartością minimalną indukcyjności własnej stojana po transformacji do układu alfa-beta, γ - kątem położenia wirnika (rys. 2.28).

Indukcyjności synchroniczne podłużna L_d i poprzeczna L_q są równe [8]:

$$L_d = l_d + m_d, \quad (2.108)$$

$$L_q = l_q + m_q. \quad (2.109)$$

Indukcyjność dla składowej zerowej prądu jest równa:

$$L_0 = l_d - 2m_d = l_q - 2m_q. \quad (2.110)$$

Pozostałe wartości indukcyjności:

$$L_\beta = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\gamma, \quad (2.111)$$

$$M_{\alpha\beta} = \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\gamma, \quad (2.112)$$

$$M_{\alpha f} = M_{df} \cos \gamma, \quad (2.113)$$

$$M_{\beta f} = M_{df} \sin \gamma, \quad (2.114)$$

$$M_{\alpha D} = M_{dD} \cos \gamma, \quad (2.115)$$

$$M_{\beta D} = M_{dD} \sin \gamma, \quad (2.116)$$

$$M_{\alpha Q} = -M_{qQ} \sin \gamma, \quad (2.117)$$

$$M_{\beta Q} = M_{qQ} \cos \gamma. \quad (2.118)$$

Pozostałe wartości indukcyjności przyjmują wartości stałe. Używana jest także transformacja do układu współrzędnych wirujących z prędkością wirowania wirnika [1][13], nazywana transformacją Parka. Transformacja taka jest równoznaczna z lewostronnym pomnożeniem równań w układzie alfa-beta (2.99) (2.100)) przez macierz podaną zależnością (2.119) [13]:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.119)$$

W takim przypadku równania opisujące generator synchroniczny przyjmą postać:

$$\frac{d[\psi_{dq}]}{dt} + [R][i_{dq}] + [e_{rot}] + [u_{dq}] = 0. \quad (2.120)$$

W równaniach pojawia się siła elektromotoryczna rotacji wynikająca z mnożenia równań przez macierz o współczynnikach zmiennych w czasie. Wartość macierzy $[e_{rot}]$ jest równa:

$$[e_{rot}] = \begin{bmatrix} \omega \Psi_q \\ -\omega \Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.121)$$

Poszczególne macierze występujące w równaniu (2.120) przyjmują postać:

$$[\Psi_{dq}] = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix}, \quad (2.122)$$

$$[i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad (2.123)$$

$$[u_{dq}] = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ -u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.124)$$

$$[\Psi_{dq}] = [L_{dq}][i_{dq}], \quad (2.125)$$

$$[L_{dq}] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 3/2M_{df} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ 3/2M_{dD} & 0 & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 3/2M_{qQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}. \quad (2.126)$$

Pełny opis stanów przejściowych należy uzupełnić o równanie dynamiki dla ruchu obrotowego:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e, \quad (2.127)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wirnika,

M_m – moment napędowy generatora,

M_e – moment elektromagnetyczny generatora,

J – moment bezwładności.

Wartość momentu elektromagnetycznego możemy wyznaczyć obliczając pochodną zmian energii zgromadzonej w polu magnetycznym względem kąta obrotu wału wirnika.

Otrzymamy [1][11]:

$$M_e = \frac{3}{2}p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{3}{2}p(\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha). \quad (2.128)$$

Współczynnik $3/2$ wynika z faktu przyjęcia transformacji układu współrzędnych, która nie zachowuje równej mocy [13], a p jest liczbą par biegunów maszyny synchronicznej.

Równania opisujące dynamikę maszyn synchronicznych mają wiele parametrów, których wartości są uzależnione od budowy maszyny. W maszynie cylindrycznej, przy równomiernej szczelinie powietrznej, indukcyjności własne obwodów d i q są sobie równe: $L_d = L_q$. W maszynie jawnobiegunowej różne wartości tych wielkości powodują powstanie momentu nazywanego reluktancyjnym. Od wartości występujących tu parametrów zależą wartości prądów przepływających przez maszynę w różnych stanach przejściowych. W energetyce nie wyznacza się wszystkich parametrów takich maszyn, podaje się jedynie wartości współczynników, na podstawie których możliwe jest szacowanie wartości maksymalnych prądów w różnych stanach przejściowych, opisywanych przede wszystkim dla pracy generatorów synchronicznych. Do takich współczynników należą reaktancje podprzejściowe: podłużna X''_d oraz poprzeczna X''_q , oraz reaktancje przejściowe: podłużna X'_d i poprzeczna X'_q . Mają one istotne znaczenie do szacowania wartości prądów stanach zwarcia udarowego.

2.12. Zwarcie udarowe generatora synchronicznego

Podprzejściowa reaktancja podłużna [8] X''_d jest to iloraz wartości nagle zmienionej podstawowej harmonicznej napięcia twornika, indukowanej całkowitym podłużnym strumieniem wirnika, odpowiadającej jej podstawowej harmonicznej składowej periodycznej podłużnego prądu twornika przy znamionowej prędkości obrotowej wirnika. Dzięki tej wielkości możemy szacować wartość prądu twornika w pierwszej chwili symetrycznego zwarcia udarowego [1]:

$$I_d'' = \frac{E_0}{X_d''}. \quad (2.129)$$

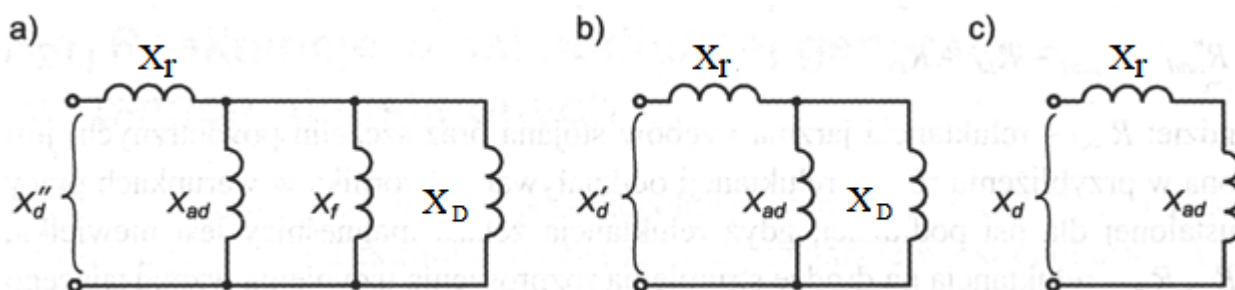
gdzie E_0 jest to wartość siły elektromotorycznej przed zwarciem.

Jeżeli generator nie ma uzwojenia tłumiącego [1] w postaci klatki, to analogiczną rolę do prądu płynącego w uzwojeniach klatki odgrywają prądy wirowe w masywnych elementach wirnika. Prądy te zanikają w czasie w zależności od odpowiednich stałych czasowych. Z uwagi na fakt znacznie mniejszej wartości indukcyjności w obwodach zwartych od indukcyjności obwodu wzbudzenia najpierw zanika dodatkowy prąd w uzwojeniu tłumiącym. W takim momencie praca maszyny przechodzi w tzw. stan przejściowy. Wartość prądu zwarcia w takim momencie jest zależna od wartości przejściowej reaktancji podłużnej X_d' , definiowanej jako [8] iloraz początkowej wartości nagle zmienionej podstawowej harmonicznej składowej periodycznej napięcia twornika indukowanego całkowitym podłużnym strumieniem twornika i odpowiadającej jej wartości podstawowej harmonicznej składowej periodycznej podłużnego prądu twornika przy znamionowej prędkości obrotowej wirnika po wyeliminowaniu (zaniku) podprzejściowych składowych napięcia i prądu twornika. Szacowana wartość prądu twornika wyraża się zależnością [1]:

$$I_d' = \frac{E_0}{X_d'}. \quad (2.130)$$

Na rys. 2.30 pokazano schematy zastępcze dla reaktancji w osi podłużnej generatora w stanach przejściowych z wyodrębnioną reaktancją rozproszenia X_r :

- a) reaktancja X_d'' w stanie podprzejściowym,
- b) reaktancja X_d' w stanie przejściowym,
- c) reaktancja X_d w stanie ustalonym.



Rys. 2.30. Schemat zastępczy dla reaktancji w osi podłużnej generatora w stanach nieustalonych [1]

Tabela 2.1 Wybrane parametry turbogeneratorów cylindrycznych

P_N	x''_d	x'_d	x_d	T''_d	T'_d	T_a
MW	-	-	-	s	s	s
2	0,15	0,26	1,62	0,06	0,05	0,08
6	0,13	0,19	1,72	0,09	0,07	0,16
30	0,15	0,24	2,34	0,13	1,05	0,20
50	0,15	0,22	2,02	0,16	1,30	0,26
120	0,15	0,21	1,84	0,20	1,80	0,20
200	0,19	0,27	1,88	0,12	0,92	0,31
360	0,22	0,23	2,43	0,11	0,89	0,37
500	0,26	0,35	2,55	0,17	1,36	0,36

T''_d – elektromagnetyczna stała czasowa podprzejściowa

T'_d – elektromagnetyczna stała czasowa przejściowa

T_a – elektromagnetyczna stała czasowa aperiodyczna

Wartości poszczególnych reaktancji w maszynach synchronicznych zależą od mocy, napięcia znamionowego oraz konstrukcji. Przykładowe wartości reaktancji podane w jednostkach względnych definiowanych, jako wielkości odniesione do impedancji znamionowej (2.132), gdzie U_n i I_n to znamionowe wartości napięcia prądu fazowego, wyrażonej zależnością (2.131) ujęte zostały w tabeli 1 [1].

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n}, \quad (2.131)$$

$$x = \frac{X}{Z_n}. \quad (2.132)$$

Widoczne jest, że wartość skuteczna prądu w stanie podprzejściowym jest nawet dziesięciokrotnie większa od prądu zwarcia w stanie ustalonym.

Udarowym prądem zwarciovym [1] I_{km} nazywamy wartość szczytową prądu w czasie pierwszego okresu po zwarcu. Analiza stanu zwarcia udarowego prowadzi do wniosku [1], że jego wartość może być w przybliżeniu oszacowana jako:

$$I_{km} \approx (1,7 \div 1,9) \sqrt{2} \frac{E_0}{x''_d}. \quad (2.133)$$

Wartość tego prądu decyduje o siłach dynamicznych występujących pomiędzy poszczególnymi prętami uzwojenia twornika. Mogą one doprowadzić do odkształceń połączeń czołowych uzwojeń lub uszkodzenia układu izolacyjnego maszyny.

W przypadku zwarć niesymetrycznych pojawiają się zjawiska wynikające ze składowych pola magnetycznego wirujących przeciwnie do wirowania wirnika. Podobnie jak dla omawianych zjawisk w osi podłużnej występują podobne zjawiska w osi poprzecznej. Definiuje się odpowiednie reaktancja dla zjawisk występujących w osi

poprzecznej. I tak podprzejściowa reaktancja poprzeczna X''_q definiowana jest [8] jako iloraz początkowej wartości nagle zmienionej podstawowej harmonicznej periodycznej napięcia twornika indukowanej całkowitym poprzecznym strumieniem wirnika i odpowiadającej jej wartości podstawowej harmonicznej periodycznej poprzecznego prądu twornika przy znamionowej wartości prędkości obrotowej. Natomiast przejściowa reaktancja poprzeczna X'_q jest to ten sam stosunek po wyeliminowaniu podprzejściowych składowych napięcia i prądu. Potrzeba definiowania takiej wartości występuje [8] jednak jedynie w przypadku, kiedy maszyna synchroniczna poza uzwojeniem wzbudzenia w osi podłużnej ma także uzwojenie wzbudzenia w osi poprzecznej.

2.13. *Rozruch asynchroniczny maszyny synchronicznej*

Maszyna synchroniczna, pracująca jako silnik, często jest bezpośrednio włączana do sieci. W takiej sytuacji na wirniku występuje klatka rozruchowa, której zadaniem jest wytworzenie momentu asynchronicznego [3]. Uzwojenie wzbudzenia jest odłączone od zasilania. W czasie rozruchu w uzwojeniu tym indukuje się duża wartość napięcia, które może uszkodzić izolację maszyny. W celu ograniczenia tego napięcia do uzwojenia wzbudzenia dołącza się odpowiednio dobrany rezystor (rys. 2.31).

W zamkniętym obwodzie uzwojenia wzbudzenia płynie prąd, który wytwarza względem wirnika pole pulsujące o częstotliwości f_2 wynikającej z poślizgu oraz częstotliwości napięcia zasilającego trójfazowe uzwojenie stojana f_1 .

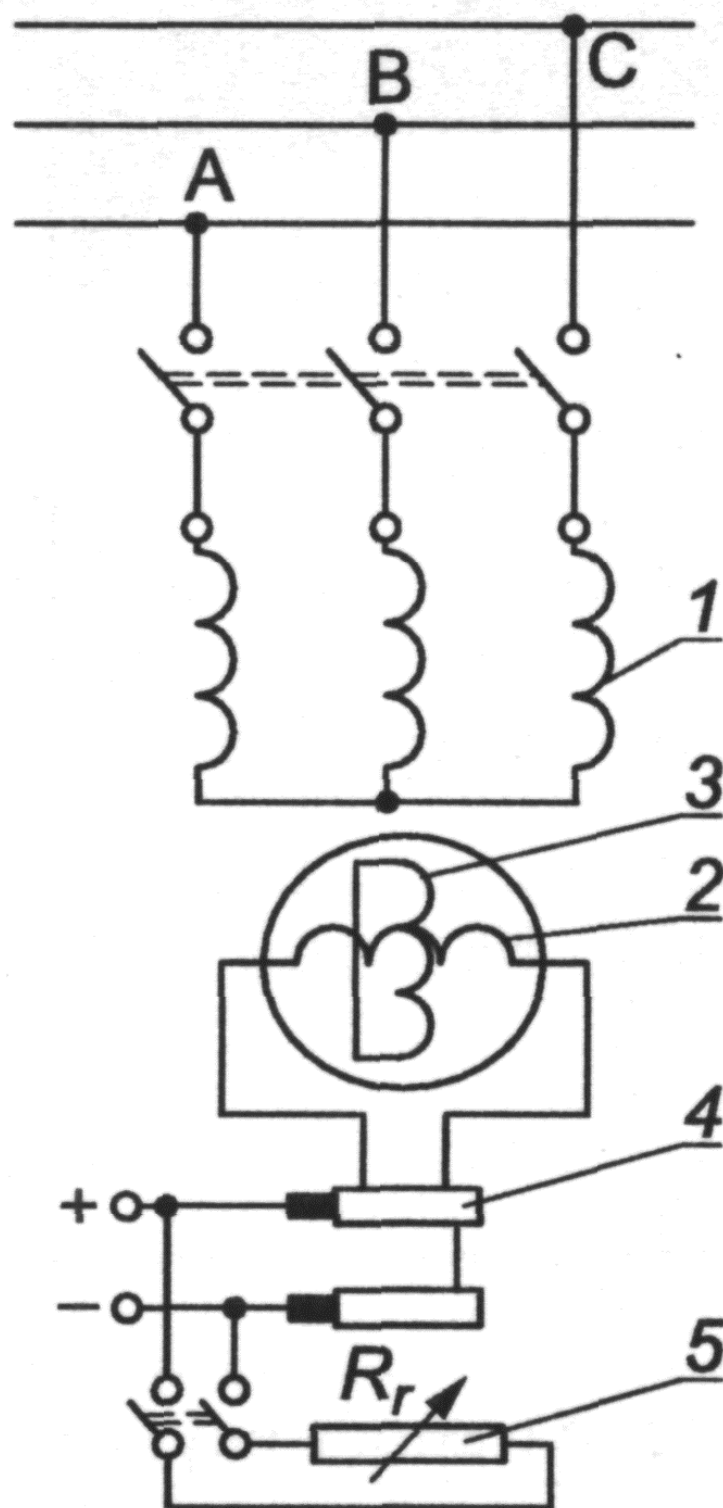
$$f_2 = sf_1. \quad (2.134)$$

Wartość poślizgu jest zależna od prędkości synchronicznej n_1 oraz prędkości wirowania wirnika n :

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.135)$$

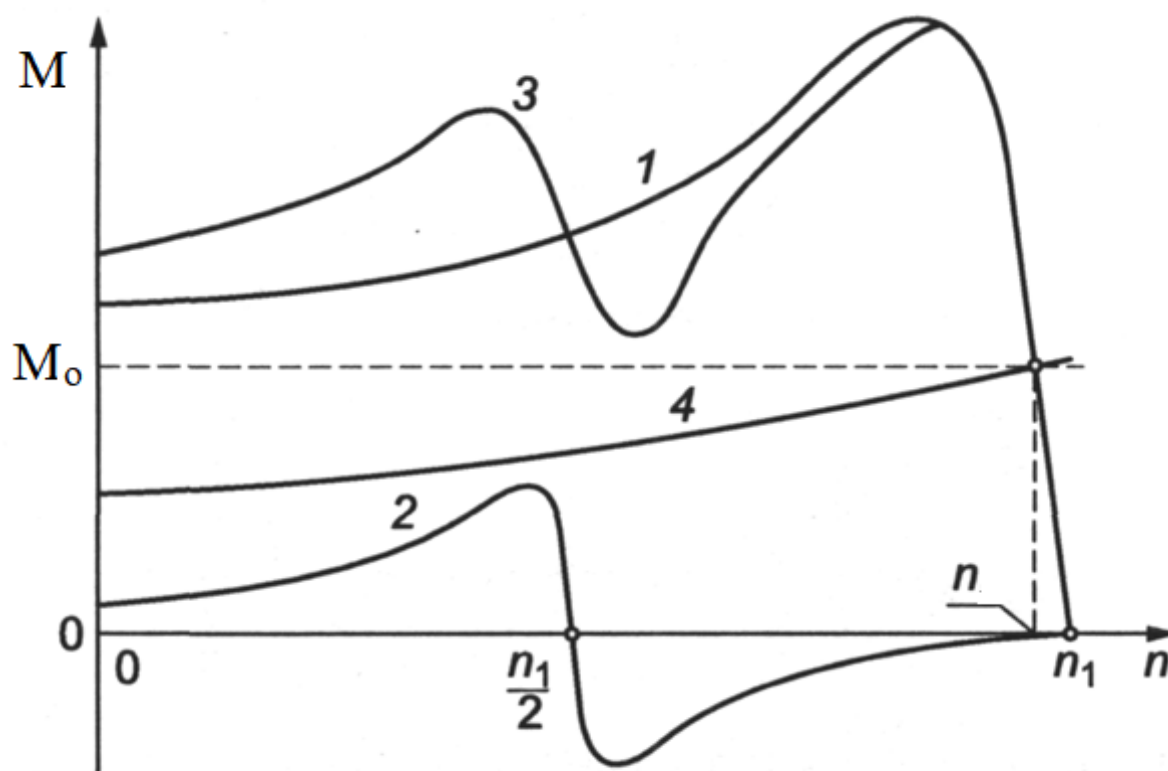
Wartość prędkości wirnika n zależy od poślizgu zgodnie ze wzorem:

$$n = n_1(1 - s). \quad (2.136)$$



Rys. 2.31. Schemat połączeń maszyny synchronicznej przy rozruchu asynchronicznym [3]:

1 – uzwojenie twornika, 2 – uzwojenie wzbudzenia, 3 – klatka rozruchowo-tłumiąca,
4 – pierścienie, 5 – rezystor rozruchowy.



Rys. 2.32. Moment maszyny synchronicznej w czasie rozruchu asynchronicznego [3]:

- 1 – moment od składowej zgodnej pola wirującego,
- 2 – moment od składowej przeciwnej pola wirującego,
- 3 – moment wypadkowy,
- 4 – moment obciążenia.

Pole to można rozłożyć na składową wirującą zgodnie z kierunkiem ruchu wirnika oraz na składową przeciwną. Względem uzwojeń stojana składnik pola wirującego zgodnie n_{zg} wiruje z prędkością synchroniczną:

$$n_1 = n + sn_1 = n_1(1 - s) + sn_1 = n_1. \quad (2.137)$$

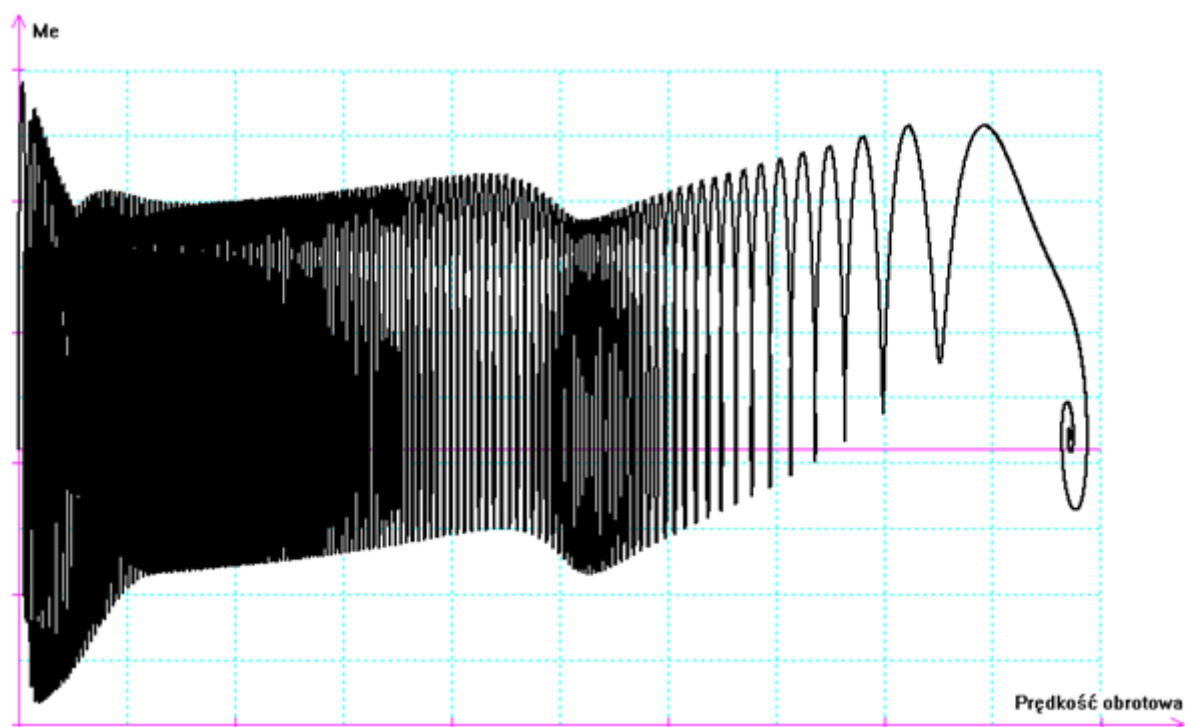
Składowa przeciwna wiruje względem stojana z prędkością n_{prz} o wartości:

$$n_1 = n - sn_1 = n_1(1 - s) - sn_1 = n_1(1 - 2s). \quad (2.138)$$

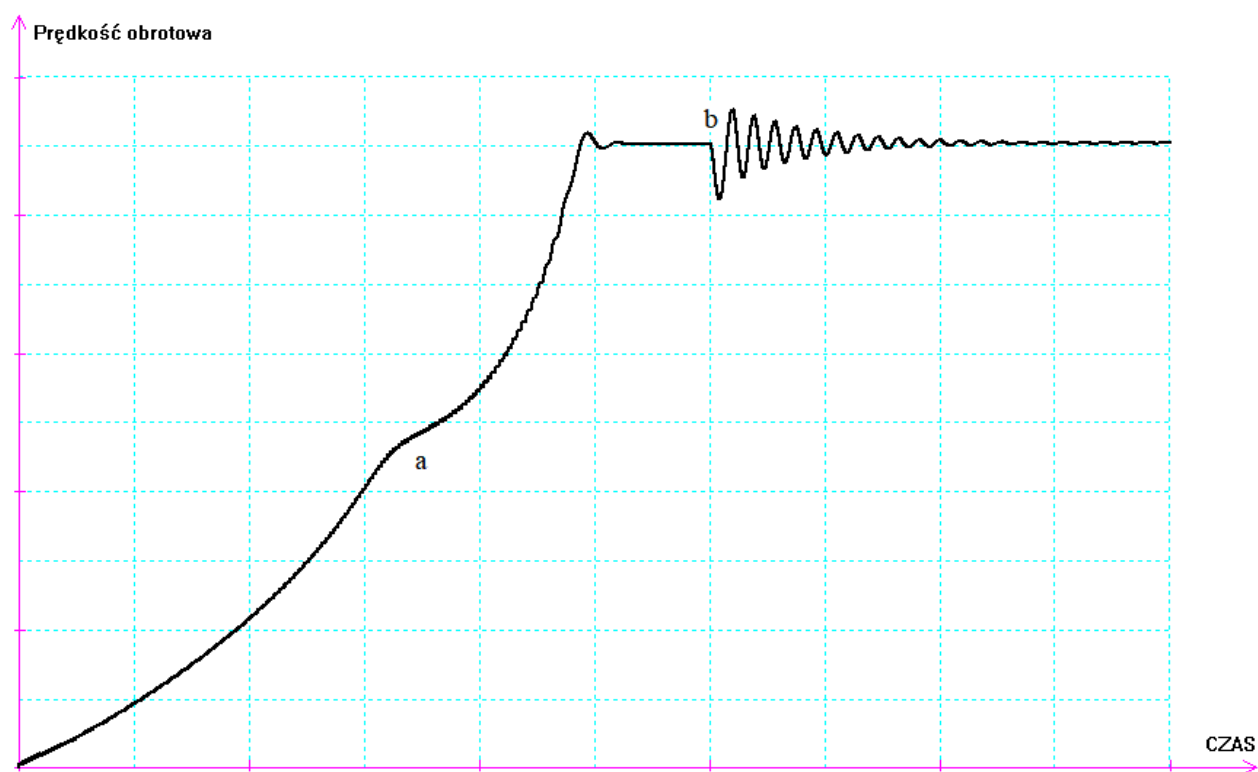
Składowa przeciwna pola wirującego wytwarza w stojanie napięcie o częstotliwości zależnej od poślizgu i wytwarza moment asynchroniczny o wartości równej zero przy poślizgu równym $s=0,5$.

Na rys. 2.32 pokazano poszczególne składniki momentu wytwarzanego w silniku. Charakterystyka oznaczona symbolem 1 reprezentuje moment wytwarzany przez pole

wirujące zgodnie z kierunkiem obrotu wirnika i jest to składnik wynikający zarówno z istnienia klatki rozruchowej, jak i składowej zgodnej pola wytwarzanego przez uzwojenie wzbudzenia. Symbol 2 prezentuje składnik momentu generowanego przez składową przeciwną pola wirującego wytworzonego przez prąd płynący przez uzwojenie wzbudzenia. Wypadkowy kształt charakterystyki mechanicznej przedstawia krzywa 3. Widoczne jest tu wyraźne zmniejszenie momentu w połowie prędkości synchronicznej. Zjawisko to nosi nazwę efektu Görgesa [10]. Źle dobrany rezystor rozruchowy może powodować, że nie nastąpi pełny rozruch silnika i w stanie ustalonym maszyna będzie obracać się z prędkością bliską połowie prędkości synchronicznej. Krzywa 4 reprezentuje sobą moment obciążenia silnika. Po prawidłowym rozruchu asynchronicznym maszyna będzie pracowała z prędkością n przy momencie M_0 . Po tym czasie należy odłączyć rezystor oraz włączyć zasilanie wirnika i ustawić odpowiednią wartość prądu wzbudzenia. W takiej chwili następuje tzw. wpad w synchronizm i maszyna zaczyna pracować z prędkością synchroniczną. Definiuje się znamionowy moment wpadu jako wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego w maszynie przy prędkości równej 95% prędkości znamionowej [10]. Rys. 2.32 przedstawia wartość średnią momentu jaką, wytwarza maszyna w stanie ustalonym. Nie ma tu składników wynikających z nierównomiernej szczeliny powietrznej czy remanentu magnetycznego. Rzeczywisty rozruch zawiera składniki powodujące oscylacje momentu w czasie rozruchu. Dopiero w pracy synchronicznej zanikają drgania maszyny. Na rys. 2.34 pokazano przebieg wartości prędkości obrotowej w czasie rozruchu, z widocznym miejscem efektu Görgesa (punkt a) oraz chwilą włączenia napięcia do obwodu wzbudzenia (punkt b). Wyraźnie widoczne są oscylacje prędkości obrotowej wirnika i związane z tym tzw. kołysanie wirnika (oscylacje) kąta obciążenia maszyny w chwili włączenia napięcia zasilającego obwód wzbudzenia.



Rys. 2.33. Moment elektromagnetyczny maszyny synchronicznej w czasie rozruchu asynchronicznego



Rys. 2.34. Przebieg prędkości kątowej wału wirnika w czasie rozruchu asynchronicznego maszyny synchronicznej (a - efekt Görgeza, b – wpad w synchronizm)

2.14. Uwagi ogólne

Istota budowy i zjawisk fizycznych w maszynach elektrycznych jest podstawą tworzenia przetworników elektromechanicznych. Szybki rozwój elektroniki mocy spowodował, że współczesne maszyny wirujące pracują w połączeniu z przetwornikami energoelektronicznymi, które służą do sterowania elementami wykonawczymi, czyli silnikami elektrycznymi, lub do przetwarzania energii elektrycznej na praktycznie dowolny kształt napięcia i prądu. Stanowi to doskonałe narzędzie do sterowania położeniem, prędkością czy momentem silnika. Maszyny prądu stałego pracują głównie przy zasilaniu z przetworników energoelektronicznych, zamieniających napięcie sinusoidalne sieci na odpowiednie napięcie o wartości stałej (AC/DC), lub przetwornic prądu stałego na stały (DC/DC) o innych wartościach napięcia. Standardem jest wykorzystanie do tego celu maszyn prądu stałego pracujących jako maszyny obcowzbudne lub wzbudzone magnesami trwałymi. W maszynach prądu stałego krytycznym elementem jest komutator, stąd eliminacja komutatora, przy zachowaniu cech maszyny prądu stałego, prowadzi do połączenia maszyn elektrycznych z przetwornikami w jednym urządzeniu. Coraz częściej w przemyśle pojawiają się maszyny nazywane bezkomutatorowymi maszynami prądu stałego lub maszynami z komutatorem elektronicznym (brushless DC - BLDC). Konstrukcja maszyny przypomina tu maszynę synchroniczną, w której na wirniku umieszczony jest magnes trwały, a ideę komutatora stanowi tu odpowiednie sterowanie pracą kluczy energoelektronicznych w zależności od położenia magnesów względem uzwojeń stojana.

Z uwagi na postęp w dziedzinie produkcji magnesów trwałych coraz częściej stosuje się wzbudzenie magnetoelektryczne w maszynach o dużych mocach. W elektrowniach wiatrowych często stosuje się maszyny synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi (*Permanent Magnet Synchronous Motor* - PMSM) wraz z przetwornikami zapewniającymi przetworzenie energii elektrycznej uzyskanej z maszyny synchronicznej na wymaganą postać dopasowaną do sieci energetycznej. Dzięki takim rozwiązaniom zapewnia się regulację parametrów elektrycznych niezbędnych do optymalnej pracy z siecią elektroenergetyczną.

Przy małych mocach maszyn często, poza maszynami typu BLDC, stosuje się rozwiązania wykorzystujące moment reluktancyjny lub wzbudzenie magnetoelektryczne przy odpowiednim sterowaniu przekształtnikami. Stosowane są na przykład silniki skokowe (reluktancyjne, magnetoelektryczne i hybrydowe), silniki reluktancyjne (*switched reluctance motor* - SRM).

Analiza współczesnych układów napędowych wymaga zatem uwzględnienia zjawisk wynikających ze specyfiki działania przekształtników energoelektronicznych. Zmiany dotyczą tu także konieczności stosowania odpowiedniego okablowania, sterowania pracą urządzeń przekształtnikowych, uwzględnienia znacznie większego prądu upływu, istnienia tzw. prądów łożyskowych oraz innych zjawisk nie omawianych w tej publikacji. Zagadnienia opisane w niniejszej publikacji dotyczą jedynie podstawowych zjawisk oraz modeli matematycznych maszyn prądu stałego, jak też maszyn synchronicznych. Praca ta wraz z publikacją [13] stanowią kompletny opis podstaw budowy i działania maszyn elektrycznych i transformatorów.

Bibliografia

- [1] Anuszczyk J.: Maszyny elektryczne w energetyce, WNT, Warszawa 2005
- [2] Chapman S. J.: Electrical Machinery Fundamentals. McGraw Hill, New York 2005
- [3] Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice 2015.
- [4] Glinka T.: Maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi. WNT, Warszawa 2018.
- [5] <http://docplayer.pl/2173613-Maszyny-elektryczne-maszyny-synchroniczne-1-prof-dr-hab-inz-tadeusz-skoczkowski.html>
- [6] http://ekologia.wojaszowka.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=103
- [7] http://zsptwardogora.pl/witamy/images/stories/maszyny_kl2/23.Turbiny_parowe.pdf
- [8] Latek W.: Turbogeneratory. WNT, Warszawa 1973.
- [9] Mitew E.: Maszyny Elektryczne, t.1 i 2. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2005
- [10] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1982
- [11] Przyborowski W., Kamiński G.: Maszyny elektryczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
- [12] Sen P. G.: Principles of electric machines and Power electronics, John Wiley & Sons, Ontario 1997
- [13] Sołbut A.: Maszyny elektryczne 1. Transformatory. Maszyny indukcyjne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2017
- [14] Syed Nasar: Electric machines and electromechanics. Schaum's outline series. McGraw Hill, New York 1998.
- [15] Turowski J.: Elektrodynamika techniczna. PWN, Warszawa 2014.
- [16] Wildi T.: Electrical Machines, Drives and Power Systems. Pearson Education, New Jersey 2006

Spis ilustracji

Rys. 1.1. Zasada działania generatora prądu przemiennego [16]	2
Rys. 1.2. Napięcie indukowane w generatorze prądu przemiennego [16]	3
Rys. 1.3. Istota działania komutatora [16]	3
Rys. 1.4. Napięcie pomiędzy szczotkami w maszynie prądu stałego [16]	4
Rys. 1.5. Przekrój maszyny prądu stałego [10]:	7
Rys. 1.6. Uzwojenie pierścieniowe wirnika [10].	8
Rys. 1.7. Uzwojenie bębnowe wirnika [10]	9
Rys. 1.8. Wypadkowe napięcie indukowane w maszynie prądu stałego [2]	9
Rys. 1.9. Zależność oscylacji napięcia indukowanego w wirniku od liczby wycinków komutatora [2]	10
Rys. 1.10. Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Richtera) [2] ..	11
Rys. 1.11. Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Arnolda) [2] ...	12
Rys. 1.12. Zależność strumienia magnetycznego od prądu wzbudzenia w maszynie obcowzbudnej prądu stałego	13
Rys. 1.13. Rozkład pola magnetycznego w maszynie prądu stałego – efekt reakcji twornika [16]	13
Rys. 1.14 Rozkład pola magnetycznego od prądu twornika (reakcja twornika) [16][12] ..	14
Rys. 1.15. Zależność strumienia magnetycznego w maszynie prądu stałego od prądu twornika: a) pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego, b) wpływ nasycenia fragmentów rdzenia	15
Rys. 1.16. Uzwojenie twornika i jego połączenie z komutatorem [12]	16
Rys. 1.17. Proces komutacji [12]	16
Rys. 1.18. Schemat zastępczy zezwoju komutującego [9]	17
Rys. 1.19. Komutacja prostoliniowa a), opóźniona b) i przyspieszona c) [9]	17
Rys. 1.20. Schemat umieszczenia uzwojeń kompensacyjnych [12]	19
Rys. 1.21. Zależność całkowitej rezystancji w obwodzie twornika od prądu twornika.	20
Rys. 1.22. Różne sposoby połączeń uzwojenia wzbudzenia z obwodem twornika: (a) maszyna obcowzbudna, (b) maszyna szeregową, (c) maszyna bocznikowa, (d) połączenia mieszane (bocznikowo-szeregowe)[12]	21
Rys. 1.23. Schemat połączeń generatora obcowzbudnego [12]	22
Rys. 1.24. Charakterystyka zewnętrzna generatora obcowzbudnego	22
Rys. 1.25. Schemat połączeń generatora bocznikowego [12]	23
Rys. 1.26. Proces samowzbudzenia w generatorze bocznikowym [12]	24
Rys. 1.27. Rezystancja krytyczna w generatorze bocznikowym [12]	24
Rys. 1.28. Obciążenie generatora bocznikowego [12]	25
Rys. 1.29. Charakterystyka zewnętrzna generatora bocznikowego [12]	25
Rys. 1.30. Schemat połączeń silnika obcowzbudnego [12]	27
Rys. 1.31. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego: a) obwód magnetyczny liniowy, b) uwzględnienie poprzecznej reakcji twornika.	28
Rys. 1.32. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości napięcia twornika	28
Rys. 1.33. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości rezystancji w obwodzie twornika	29
Rys. 1.34. Charakterystyka mechaniczna silnika obcowzbudnego dla różnych wartości prądu wzbudzenia	29
Rys. 1.35. Schemat połączeń silnika bocznikowego [12]	30
Rys. 1.36. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego dla różnych wartości napięcia twornika	30

Rys. 1.37. Schemat połączeń silnika szeregowego [12]	31
Rys. 1.38. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego dla liniowego obwodu magnetycznego oraz uwzględniającego nasycenie	31
Rys. 1.39. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego przy różnych wartościach rezystancji w obwodzie twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego)	32
Rys. 1.40. Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego przy różnych wartościach napięcia twornika (pominięcie nasycenia obwodu magnetycznego)	33
Rys. 1.41. Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego z dozwojeniem szeregowym	33
Rys. 1.42. Rozruch bezpośredni obcowzbudnego silnika prądu stałego	36
Rys. 1.43. Przebieg prądu twornika w czasie rozruchu silnika prądu stałego zasilanego z prostownika dwupołkowego	37
Rys. 1.44. Zależność prędkości kątowej od prądu twornika w maszynie szeregowej prądu stałego	39
Rys. 1.45. Przykładowy przebieg wartości chwilowej prądu w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego	41
Rys. 1.46. Przykładowy przebieg wartości chwilowej momentu w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego	41
Rys. 1.47. Przykładowy przebieg wartości chwilowej prędkości kątowej w silniku uniwersalnym w czasie rozruchu bezpośredniego	42
Rys. 1.48. Oznaczenie uzwojeń w maszynach prądu stałego	43
Rys. 1.49. Metoda prądu zmiennego identyfikacji uzwojeń komutacyjnych: a) połączenie poprawne, b) połączenie błędne	44
Rys. 1.50. Połączenie uzwojeń silnika szeregowego	44
Rys. 1.51. Schemat połączeń uzwojeń silnika bocznikowego	45
Rys. 1.52. Schemat połączeń uzwojeń silnika obcowzbudnego	45
Rys. 1.53. Sposób wyznaczenia strat mechanicznych i strat w żelazie	48
Rys. 1.54. Schemat połączeń silnika repulsyjnego [10]	49
Rys. 1.55. Schemat połączeń metadyny [10]	50
Rys. 1.56. Schemat połączeń amplidyny [10]	50
Rys. 1.57. Charakterystyki zewnętrzne metadyny i amplidyny [10]	51
Rys. 1.58. Schemat połączeń rototrola [10]	52
Rys. 1.59. Charakterystyki rototrola [10]	52
Rys. 1.60. Maszyna unipolarna [10]: a) typ promieniowy; b) typ osiowy o dwóch parach pierścieni	53
Rys. 1.61. Schemat budowy prądnicy do oświetlenia wagonów	55
Rys. 1.62. Prądnica do oświetlania wagonów współpracująca z baterią akumulatorów ...	55
Rys. 2.1. Zapora elektrowni wodnej [6]	56
Rys. 2.2. Wirnik hydrogeneratora [5]	57
Rys. 2.3. Schemat ideowy elektrowni wodnej [6]	57
Rys. 2.4. Turbina parowa i turbogenerator [7]	58
Rys. 2.5. Wirnik turbogeneratora [6]	58
Rys. 2.6. Przekrój wirnika turbogeneratora [14]	59
Rys. 2.7. Trójfazowy generator cylindryczny [14]	59
Rys. 2.8. Przekrój wirnika hydrogeneratora [14]	61
Rys. 2.9. Schemat zastępczy turbogeneratora	62
Rys. 2.10. Uproszczony schemat zastępczy turbogeneratora	62
Rys. 2.11. Uproszczony schemat zastępczy turbogeneratora przy pracy samotnej	63
Rys. 2.12. Charakterystyka biegu jałowego maszyny synchronicznej	64

Rys. 2.13. Charakterystyki zwarcia ustalonego generatora synchronicznego – wyniki pomiarów	65
Rys. 2.14. Wyznaczanie zależności reaktancji synchronicznej X_d od wartości prądu wzbudzenia (linia zielona), wyniki pomiarów w wielkościach względnych	66
Rys. 2.15. Zależność prądu zwarcia ustalonego od prędkości obrotowej	67
Rys. 2.16. Charakterystyki zewnętrzne ($I_f = \text{const.}$, $n = \text{const.}$) generatora synchronicznego przy pominięciu nasycenia i rezystancji uzwojeń stojana dla różnych typów obciążeń:	68
Rys. 2.17. Wykresy wskazowe generatora cylindrycznego dla różnych typów obciążeń: ...	68
Rys. 2.18. Charakterystyki regulacyjne ($U = \text{const.}$, $n = \text{const.}$) generatora synchronicznego dla różnych typów obciążeń: (L) – idealny indukcyjny ($\cos \varphi = 0_{ind}$), (C) – idealny pojemnościowy ($\cos \varphi = 0_{poj}$), (R) – rezystancyjny ($\cos \varphi = 1$)	69
Rys. 2.19. Synchronizacja generatora synchronicznego z siecią sztywną [3]: a) na ciemno, b) na światło wirujące.	70
Rys. 2.20. Uproszczony wykres wskazowy turbogeneratora	72
Rys. 2.21. Krzywe V generatora synchronicznego ($U = \text{const.}$, $n = \text{const.}$) (Mordey'a) [3] ..	73
Rys. 2.22. Wyznaczenie reaktancji Potiera w generatorze synchronicznym	75
Rys. 2.23. Wykres Potier'a	77
Rys. 2.24. Wykres wskazowy maszyny jawnobiegunowej	78
Rys. 2.25. Praktyczny sposób rysowania wykresu wskazowego maszyny jawnobiegunowej	80
Rys. 2.26. Wartości chwilowe prądu i napięcia przy próbie małego poślizgu – wyniki pomiarów	81
Rys. 2.27. Przebiegi prądu zwarcia dwufazowego i napięcia w fazie odłączonej	83
Rys. 2.28. Zastępcze obwody generatora synchronicznego [1]	85
Rys. 2.29. Zależność indukcyjności własnej uzwojenia stojana w zależności od kąta położenia wału wirnika	88
Rys. 2.30. Schemat zastępczy dla reaktancji w osi podłużnej generatora w stanach nieustalonych [1]	94
Rys. 2.31. Schemat połączeń maszyny synchronicznej przy rozruchu asynchronicznym [3]: 1 – uzwojenie twornika, 2 – uzwojenie wzbudzenia, 3 – klatka rozruchowo-tłumiąca, 4 – pierścienie, 5 – rezystor rozruchowy.	97
Rys. 2.32. Moment maszyny synchronicznej w czasie rozruchu asynchronicznego [3]: 1 – moment od składowej zgodnej pola wirującego, 2 – moment od składowej przeciwnej pola wirującego, 3 – moment wypadkowy, 4 – moment obciążenia.	98
Rys. 2.33. Moment elektromagnetyczny maszyny synchronicznej w czasie rozruchu asynchronicznego	100
Rys. 2.34. Przebieg prędkości kątowej wału wirnika w czasie rozruchu asynchronicznego maszyny synchronicznej (a – efekt Görgeasa, b – wpad w synchronizm)	100