

Pole magnetyczne w maszynach elektrycznych

W silnikach przemiany energii elektrycznej w mechaniczną (i na odwrót) elektrycznych zachodzą w wyniku oddziaływania pola magnetycznego na przewodniki prądem. Maszyna elektryczna musi mieć obwód magnetyczny, którego zadaniem jest wytworzenie pola magnetycznego, i obwód elektryczny, w którym indukuje się siła elektromotoryczna (napięcie). Pole magnetyczne w maszynach elektrycznych może być wytwarzane przez magnes trwały (np. silniki komutatorowe prądu stałego, silniki synchroniczne, silniki skokowe) lub przez prądy płynące w przewodach umieszczonych w rdzeniu maszyny (np. maszyny indukcyjne i inne).

Uporządkowany układ przewodów w maszynie stanowi jej uzwojenie i jest obwodem elektrycznym maszyny. Prąd w uzwojeniach wytwarza pole magnetyczne i równocześnie w tych samych uzwojeniach indukują się siły elektromotoryczne.

Typ i budowa uzwojenia maszyny zależy od:

- wymaganego rodzaju pola magnetycznego, które ma być wytworzone w maszynie przy zasilaniu uzwojenia prądami lub prądem o narzuconym przebiegu czasowym,
- żądanego przebiegu siły elektromotorycznej, która ma być indukowana w uzwojeniu przy narzuconym rodzaju pola magnetycznego występującego w maszynie.

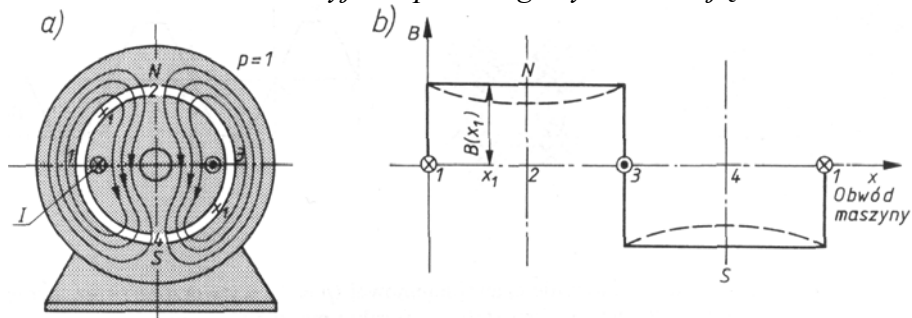
Pola magnetyczne w maszynach elektrycznych można podzielić na:

- **stałe** - oś jest nieruchoma względem elementu odniesienia, a zwrot i wartość są stałe,
- **przemienne** – pole **zmienne** jest to takie pole, którego oś jest nieruchoma względem elementu odniesienia, a zwrot i wartość ulegają zmianom w czasie. Przypadkiem szczególnym pola zmiennego jest pole **przemienne**, którego oś jest nieruchoma, a zwrot i wartość zmieniają się w czasie okresowo w taki sposób, że wartość średnia za okres jest równa zeru,
- **wirujące** - pole wirujące jest to takie pole, którego zwrot jest stały w czasie, a oś wiruje względem układu odniesienia. Szczególnym przypadkiem pola wirującego jest pole wirujące kołowe (wektor wirujący zakreśla koło), którego wartość jest stałą w czasie. Jeżeli wartość pola wirującego ulega zmianom w czasie przy stałym zwrocie, to takie pole nazywamy polem wirującym eliptycznym (wektor zakreśla elipsę)

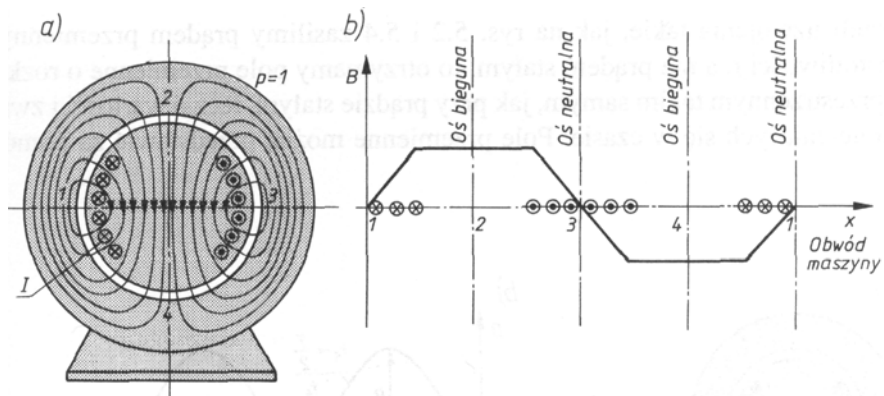
Pole magnetyczne stałe

Pola magnetyczne stałe mogą być wytwarzane w maszynach elektrycznych przez magnesy trwałe lub elektromagnesy zasilane prądem stałym. Najprostszym przykładem elektromagnesu może być jeden zwoj zasilony prądem stałym umieszczony w żłóbkach nieruchomego wirnika. Obraz pola magnetycznego wytworzonego przez zwoj, w postaci wykresu indukcji na tzw. obwodzie rozwiniętym maszyny (jakby rozwinięta powierzchnia boczna walca, którą stanowi cylindryczny wirnik lub stojan) przedstawiono na Rys. 1. Jeżeli zamiast jednego zwoju zastosujemy więcej zwojów i rozmieścimy je tak, jak na Rys. 2 i Rys. 3, to otrzymamy również pola o jednej parze biegunów, lecz innym rozkładzie indukcji. Jeżeli uzwojenie będzie się składało z dwóch cewek, ale rozmieszczonych w żłóbkach tak jak na rys. 4 (połączonych np. szeregowo) i zasilanych prądem stałym, to będzie ono wytwarzało pole czterobiegunowe (liczba par biegunów $p = 2$).

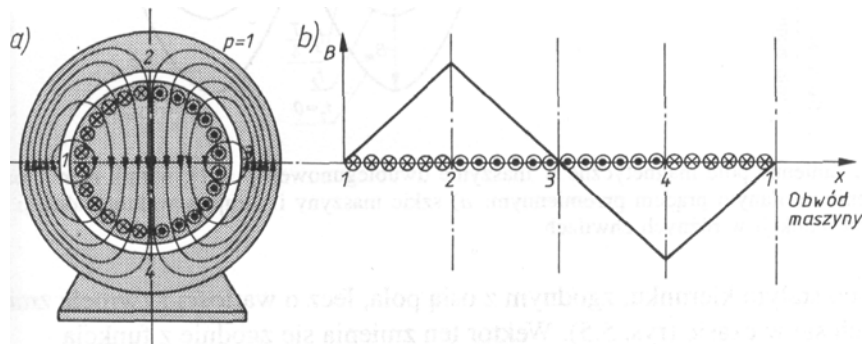
Silniki indukcyjne – pole magnetyczne wirujące



Rys. 1. Pole magnetyczne w maszynie dwubiegunowej ($p = 1$), wytworzone przez nieruchomy wirnik o jednym zwoju zasilanym prądem stałym: a) szkic maszyny, b) rozkład indukcji na rozwiniętym obwodzie maszyny.

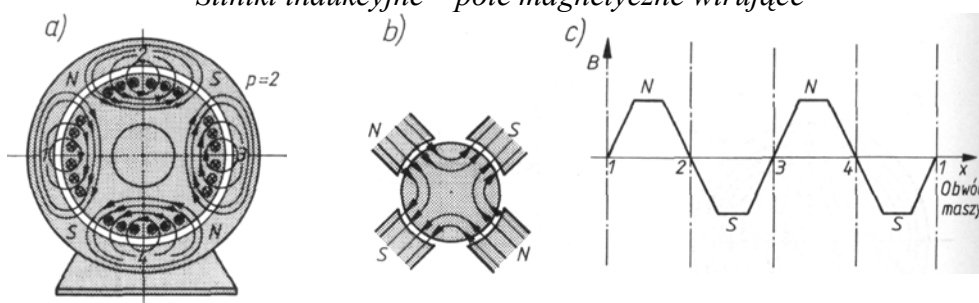


Rys. 2. Pole magnetyczne w maszynie dwubiegunowej ($p = 1$), wytworzone przez nieruchomy wirnik o uzwojeniu rozłożonym na części obwodu i zasilanym prądem stałym: a) szkic maszyny, b) rozkład indukcji na rozwiniętym obwodzie maszyny.



Rys. 3. Jak na rys. 2, ale uzwojenie rozłożone na całym obwodzie wirnika.

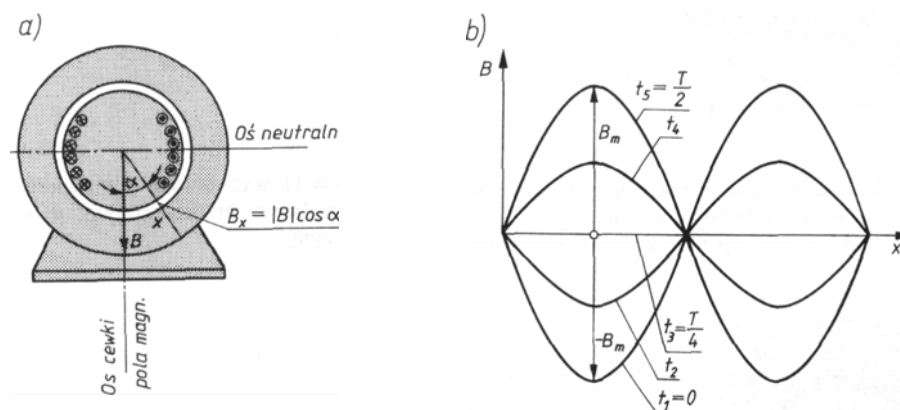
Silniki indukcyjne – pole magnetyczne wirujące



Rys. 4. Pole magnetyczne w maszynie czterobiegunowej ($p = 2$), wytworzone przez nieruchomy wirnik o uzwojeniu zasilanym prądem stałym: a) szkic maszyny, b) obraz powstałego pola magnetycznego z symbolicznie pokazanymi biegunami, c) rozkład indukcji na rozwiniętym obwodzie wirnika.

Pole magnetyczne przemienne

Jeżeli uzwojenia takie, jak na Rys. 2 i Rys. 4 zasilimy prądem przemiennym o częstotliwości f , a nie prądem stałym, to otrzymamy pole przemienne o rozkładzie przestrzennym takim samym, jak przy prądzie stałym, lecz o wartości i zwrocie zmieniających się w czasie. Pole przemienne można przedstawić za pomocą

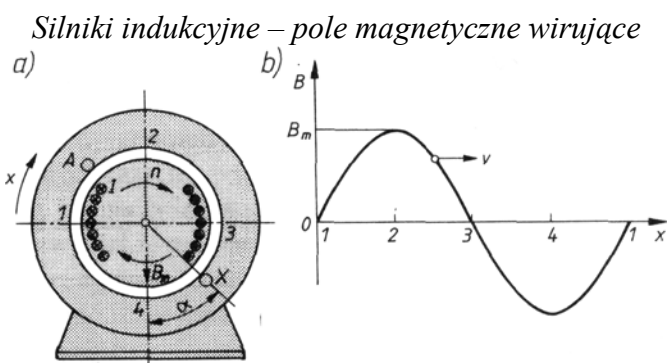


Rys. 5. Zmienne pole magnetyczne w maszynie dwubiegunowej ($p = 1$); wirnik nieruchomy o uzwojeniu zasilanym prądem przemiennym: a) szkic maszyny i wirujący wektor indukcji B , b) rozkład indukcji w różnych chwilach

wektora o stałym kierunku, zgodnym z osią pola, lecz o wartości i zwrocie zmieniających się w czasie sinusoidalnie (Rys. 5).

Pole magnetyczne wirujące

Wirujące pole magnetyczne jest wytwarzane przez **wirujący magnes trwały** lub **wirujący elektromagnes** zasilany prądem stałym (np. silniki synchroniczne). Powstające pole wiruje względem stojana, natomiast względem wirnika jest ono nieruchome. Rozkład indukcji zależy od sposobu rozmieszczenia uzwojenia i od kształtu szczeliny (rys. 5.6). W powyższych dwóch przypadkach pole magnetyczne wirujące powstaje w układzie ruchomym (element wytwarzający pole wiruje).



Rys. 6. Pole wirujące kołowe wytworzone przez prąd stały, płynący w uzwojeniu wirującego wirnika: a) szkic maszyny, b) fala postępująca indukcji B

Pole magnetyczne wirujące może powstać w układzie nieruchomym. Rozważmy uzwojenie trójfazowe symetryczne. Zwoje najczęściej są połączone w gwiazdę i zasilane prądem trójfazowym. Na Rys. 7 przedstawiono najprostsze uzwojenie trójfazowe (dla uproszczenia przekrój przez stojan z umieszczonymi w nim uzwojeniami), w którym na każdą fazę przypada jeden zwoj i każda faza wytwarza jedną parę biegunów magnetycznych. Każdy z prądów fazowych wytwarza pole przemienne w osi danego uzwojenia, pole to dogodnie jest więc zilustrować za pomocą wektora o odpowiednim zwrocie i długości, obrazującego strumień. W celu skreślenia strumienia wypadkowego pochodzącego od trzech faz, należy zsumować (dodawanie wektorów) strumienie poszczególnych faz w wybranych kolejnych chwilach. Na Rys. 7. h) przedstawiono przebiegi prądów fazowych w chwilach a, b, c, d, e, f, g

Należy uwzględnić w analizie:

- wartość i kierunek prądu w danej chwili,
- wytworzony przez ten prąd strumień magnetyczny - jego wartość i kierunek,
- zsumować geometrycznie (są to wektory) strumienie wytworzone w poszczególnych fazach
- określić jak zmienia się strumień wypadkowy.

Z rysunków widać, że pole magnetyczne wytworzone przez prąd trójfazowy stojana obraca się. Prędkość kątową, z jaką obraca się pole magnetyczne, zależy proporcjonalnie od częstotliwości prądu. Z Rys. 7 wynika, że dla maszyny dwubiegunowej (uzwojenie każdej fazy wytwarza dwa bieguny) jeden okres prądu odpowiada jednemu obrotowi pola. Gdybyśmy podobne rozumowanie przeprowadzili dla maszyny czterobiegunowej (Rys. 4), okazałoby się, że w ciągu jednego okresu pole wykona pół obrotu.

Prędkość obrotowa pola wyraża się zależnością:

$$n = \frac{f}{p} \quad [\text{obr} / \text{s}] \quad \text{lub} \quad n = \frac{60 f}{p} \quad [\text{obr} / \text{min}]$$

gdzie: f - częstotliwość [Hz]; p - liczba par biegunów magnetycznych wytworzonych przez uzwojenie jednej fazy.

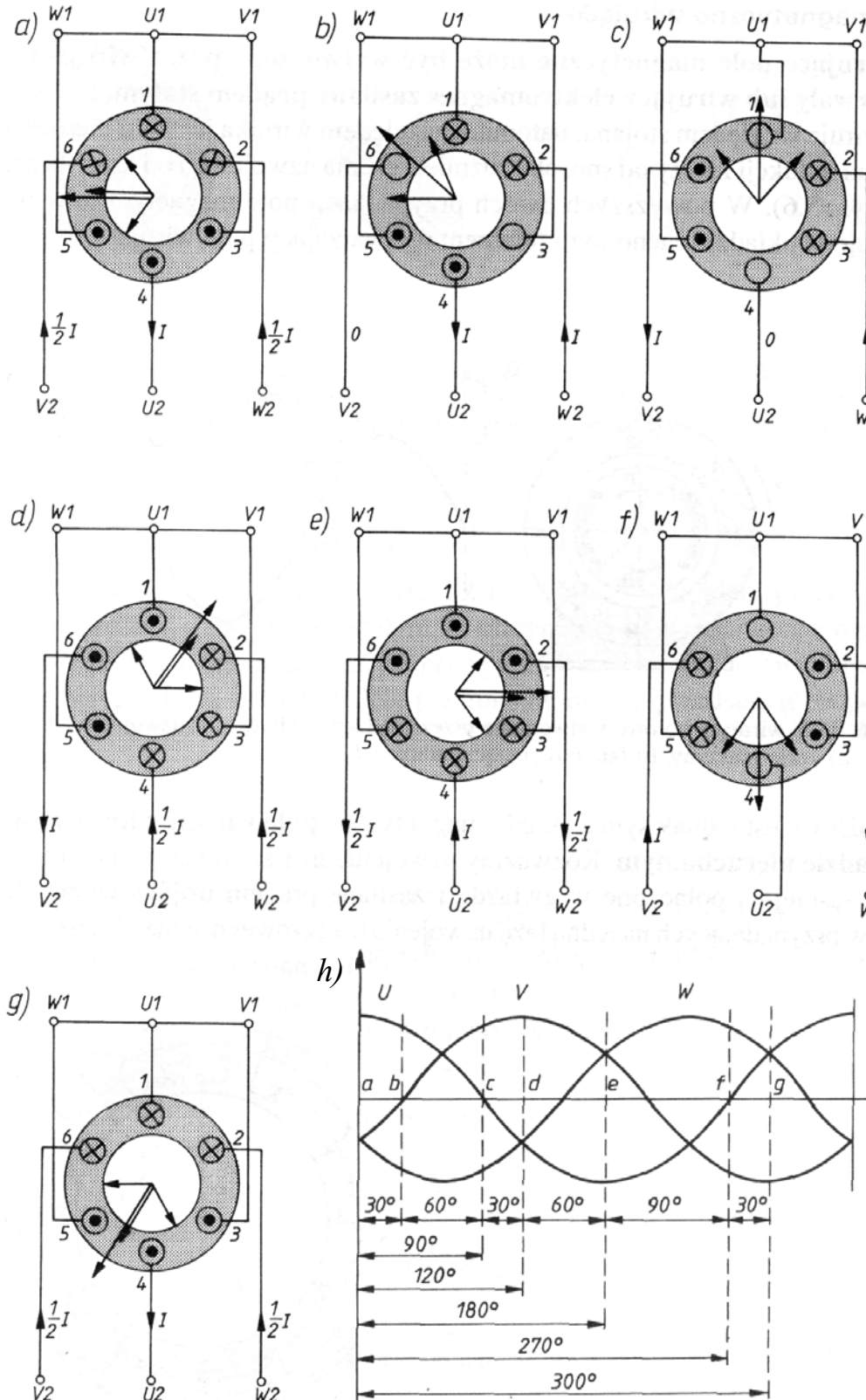
Pomimo iż żadna część maszyny nie wiruje - pole magnetyczne obraca się z prędkością n . Prędkość tę nazywamy prędkością synchroniczną.

Można sformułować następujący wniosek ogólny:

Pole magnetyczne wirujące może powstać w układzie nieruchomym tylko wówczas, gdy będą spełnione dwa warunki:

- uzwojenia są rozłożone w przestrzeni,
- uzwojenia są zasilane prądami przesuniętymi w fazie.

Silniki indukcyjne – pole magnetyczne wirujące



Rys. 7. Mechanizm powstawania wirującego pola magnetycznego. Przekrój przez stojan z uzwojeniem trójfazowym ($p = 1$); zaznaczone kierunki prądów, strumieni fazowych i strumienia wypadkowego w kolejnych chwilach: a, b, c, d, e, f, g,

h) Przebiegi prądów fazowych.

Warunki te należy uszczegółowić:

- Pole wirujące kołowe można uzyskać tylko wtedy, gdy jest zachowana następująca zależność:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_e}{p}$$

gdzie: α_m - kąt między początkami dwóch sąsiednich zwojów uzwojenia (Rys. 7),

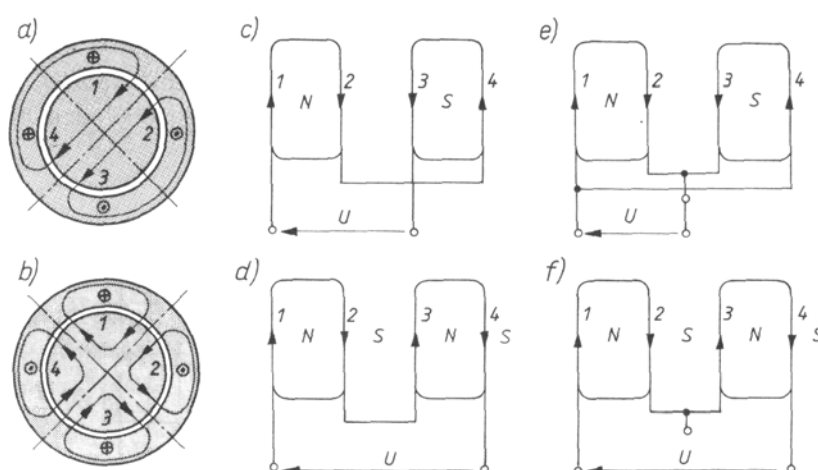
α_e - kąt przesunięcia fazowego między prądami zasilającymi, p - liczba par biegunów magnetycznych wytwarzanych przez uzwojenie jednej fazy.

- Prędkość wirowania pola magnetycznego zależy od częstotliwości prądu zasilającego i od liczby biegunów, jakie wytwarza uzwojenie.
- Przy częstotliwości sieciowej (50 Hz) maksymalna prędkość synchroniczna (prędkość wirowania pola), jaką można uzyskać, wynosi 3000 obr/min.
- Kierunek wirowania pola magnetycznego zależy od kolejności następstwa faz przy zasilaniu uzwojenia prądami fazowymi.

Uzwojenia o przełączalnej liczbie biegunów

Jak wykazano powyżej liczba par biegunów wpływa w zasadniczy sposób na prędkość wirowania pola magnetycznego, a to z kolei w sposób pośredni wpływa na prędkość wirowania wirnika w maszynie. Dlatego też często zachodzi potrzeba zmiany liczby biegunów magnetycznych w celu zmiany prędkości silnika (silniki wielobiegunowe). W takich przypadkach stosuje się tzw. uzwojenia przełączalne, w których przez zmianę układu połączeń poszczególnych grup zezwojów uzyskuje się zmianę liczby par biegunów, a więc i zmianę prędkości wirowania pola magnetycznego.

Aby zmienić liczbę par biegunów w uzwojeniu jak na Rys. 8, należy zmienić kierunek przepływu prądu w zezwoju o bokach 3 i 4. Można to zrealizować przez zmianę połączenia zezwoju zawierającego boki 3 i 4 przy zachowaniu połączenia szeregowego obu zezwojów (Rys. 8 c i d) lub przez szeregowy albo równoległy układ połączeń tych zezwojów (Rys. 8 e i f). Podana zasada przełączania uzwojeń umożliwia zmianę liczby par biegunów, a więc i prędkości w stosunku 1:2. Możliwe jest również takie wykonanie uzwojeń, że uzyskuje się zmianę prędkości w stosunku 2:3, 2:5 i inne.



Rys. 8. Zmiana liczby par biegunów: a), c), e) $p = 1$; b), d), f) $p = 2$