

## Obwód magnetyczny silnika prądu stałego

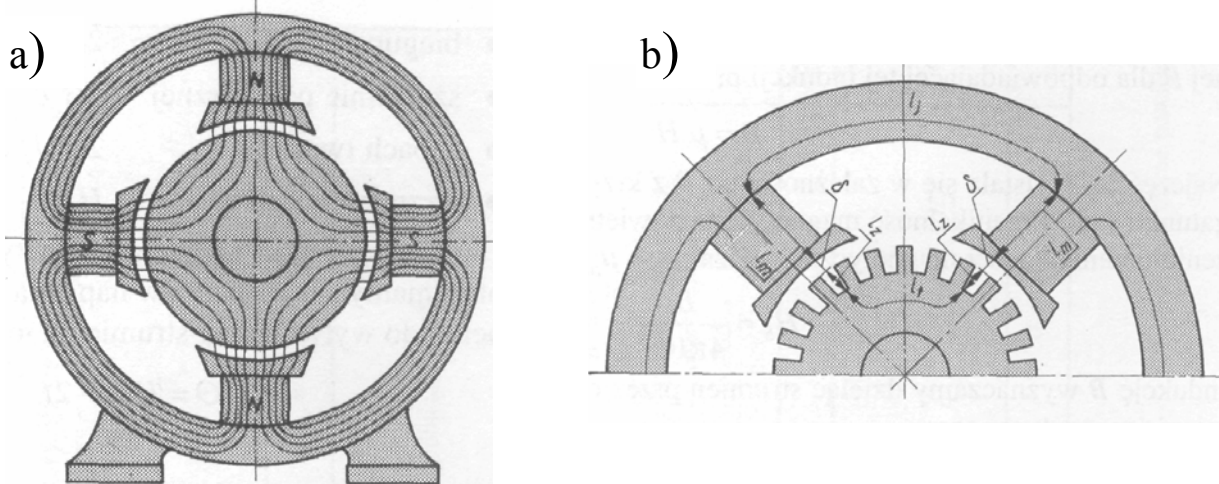
Aby w silniku DC wytworzył się moment napędowy, potrzebne są strumień magnetyczny oraz przepływ prądu w przewodzie (uzwojeniach) i oddziaływanie względem tego strumienia.

Strumień magnetyczny silników DC jest wytwarzany przez uzwojenie wzbudzące (znajdujące się na biegunach) zasilane prądem stałym lub przez magnesy stałe.

### Silniki ze wzbudzeniem

W silnikach ze wzbudzeniem do wytworzenia określonego strumienia magnetycznego potrzebny jest określony przepływ  $\Theta = IN$ . (gdzie  $I$  – płynący w uzwojeniach wzbudzenia prąd,  $N$  – ilość zwojów). Wartość przepływu wzbudzającego zależy nie tylko od wartości wymaganego strumienia, ale także od permeancji obwodu magnetycznego maszyny. Obwód magnetyczny maszyny jest to określona droga, jaką przechodzą linie strumienia magnetycznego.

Uwzględniając symetrie obwodu magnetycznego i równość strumieni wszystkich biegunów, wystarczy rozpatrywać obwód magnetyczny jednej pary biegunów (rys.8)



Rys.8. Obwód magnetyczny w czterobiegunowej maszynie prądu stałego (droga strumienia magnetycznego) a) rozkład strumienia magnetycznego b) podział drogi strumienia magnetycznego.

Drogę strumienia magnetycznego podzielono na takie części, wzdłuż których natężenie pola magnetycznego ma wartość stałą. Na poszczególnych odcinkach obwodu strumień napotyka różną reluktancję. Przez analogię do obwodu elektrycznego można przepływ rozpatrywać jako siłę magnetomotoryczną, która składa się ze spadków napięcia magnetycznego w poszczególnych częściach obwodu. Przepływ ( $\Theta = IN$ ) wytworzony przez bieguny pokrywać więc będzie spadki napięcia magnetycznego ( $H l$ ): jarzmie stojana, biegunach, szczeliny powietrznej, zębach twornika, jarzmie twornika.

Ważną rolę w obwodzie magnetycznym odgrywa szczelina między twornikiem (wirnik) a biegunem. Jest ona stosunkowo duża (ze względu na oddziaływanie twornika), nie przekracza jednak kilku milimetrów.

Drugim parametrem pozwalającym obliczyć strumień magnetyczny ( $\Phi = B s$ ) potrzebny do wyznaczenia parametrów pracy silnika, jest przenikalność magnetyczna magnetowodu (materiału ferromagnetycznego:  $B = \mu H$ ). Najczęściej  $H$  ustala się w zależności od  $B$  z krzywej magnesowania dla danego gatunku stali. Przenikalność magnetyczna powietrza jest stała i równa w przybliżeniu przenikalności magnetycznej próżni.

*Pytanie: Jak wyliczamy obwody magnetyczne ze szczeliną?*

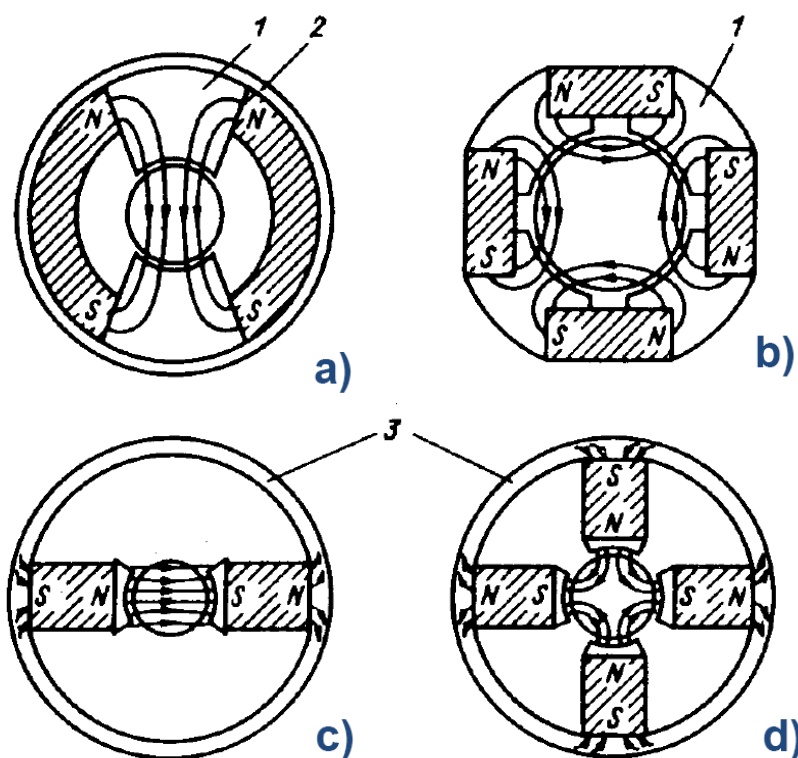
### Silniki z magnesami trwałymi

W maszynach mniejszej mocy powszechne jest zastosowanie magnesów trwałych do uzyskania pola magnetycznego wzbudzenia.

Maszyny elektryczne o magnesach trwałych mają długą historię rozwoju. Pierwsze maszyny elektryczne produkowane w XIX wieku były wzbudzane magnesami trwałymi. Jako magnesy stosowano stale węglowe. Niskie parametry magnetyczne magnesów były przyczyną tego, że po okresie około 40 lat rozwoju ich moc nie przekraczała kilku kW.

Zastosowanie wzbudzania elektromagnetycznego (H. Wilde, S. Hirot, W. Siemens) umożliwiło zdecydowaną poprawę parametrów i wzrost mocy maszyn elektrycznych prądu stałego.

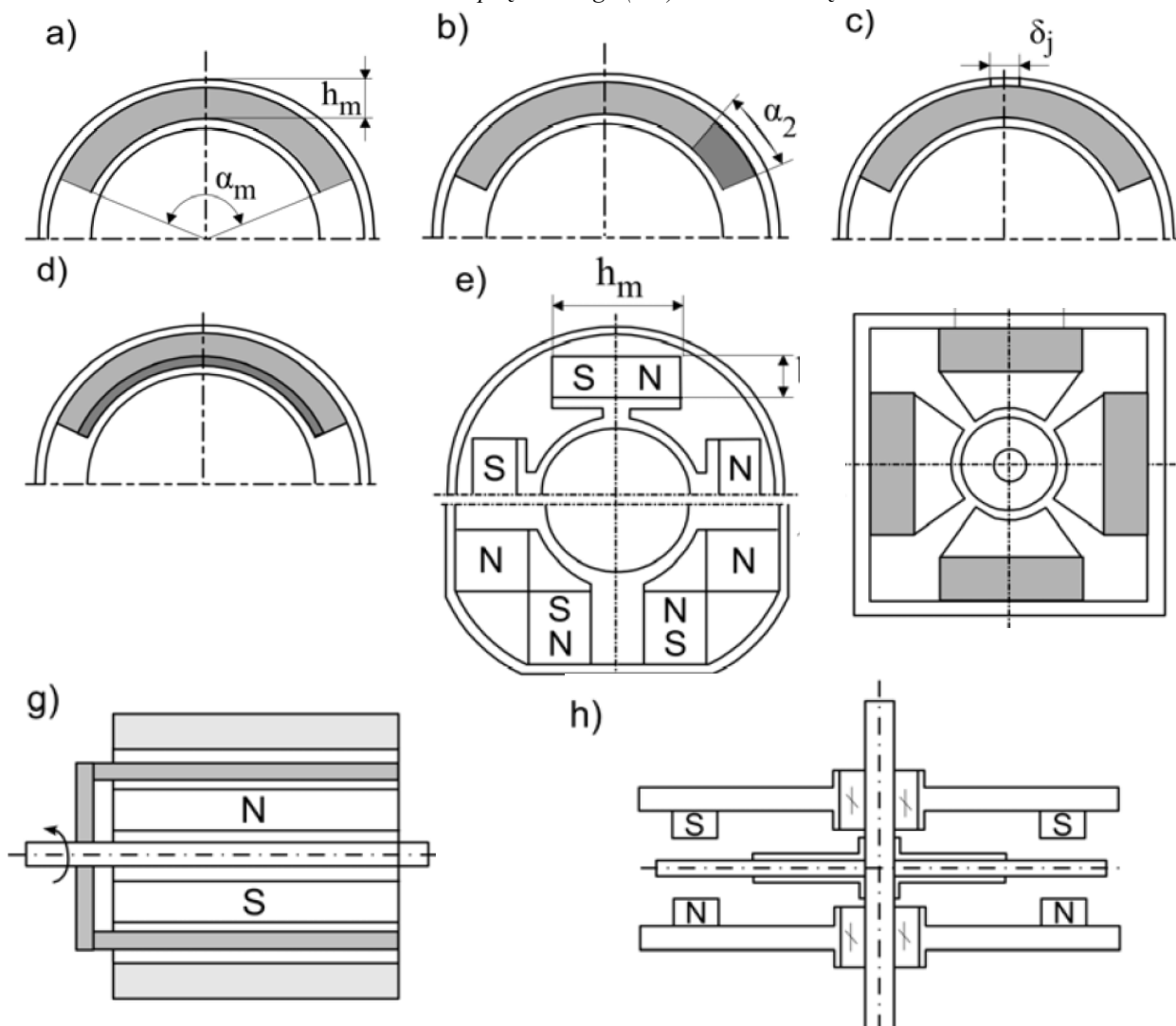
Na rys. 9. pokazano konstrukcje obwodów magnetycznych z magnesami trwałymi.



Rys. 9. Przykładowe konstrukcje magnetycznych obwodów silników prądu stałego z magnesami trwałymi. (1 – nabiegunnik, 2 – korpus, 3 – jarzmo);

- a) korpus z materiału niemagnetycznego,
- b) 4 magnesy w niemagnetycznej obudowie,
- c) korpus ze stali miękkiej magnetycznie w roli magnetowodu,
- d) walcowy korpus ze stali miękkiej magnetycznie.

Jest wiele rozwiązań kształtów i powiązania magnesów trwałych z magnetowodami. Zależone od budowy danego typu silnika. Niektóre pokazano na rys.10.



Rys.10. Rozwiązania obwodów magnetycznych silników komutatorowych:

- a) z magnesami segmentowymi,
- b) z magnesami dwuczęściowymi,
- c) z jarzmem o zwiększonej reluktancji dla strumienia oddziaływania twornika,
- d) z nabiegunnikami, e) z magnesami usytuowanymi prostopadle do kierunku promieniowego,
- f) z koncentratorami strumienia,
- g) z wirnikiem kubkowym,
- h) z wirnikiem tarczowym.

### Materiały magnetyczne twarde

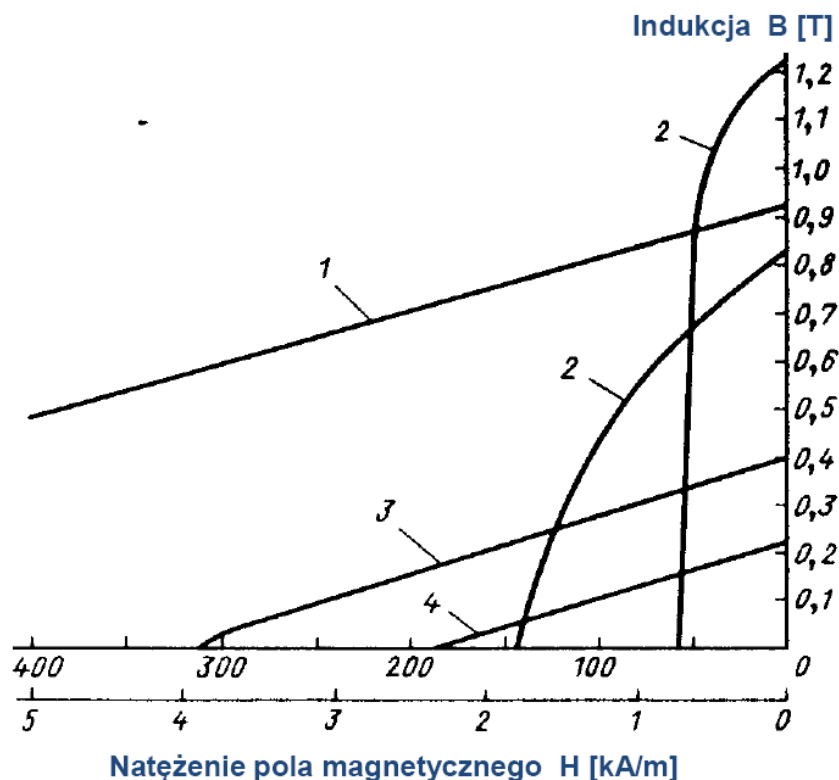
Rozwój maszyn o magnesach trwałych przyspieszył od lat trzydziestych XX wieku, kiedy to zostały opracowane magnesy Al-Ni-Co (T. Mishima, 1932). Wówczas maszyny magnetoelektryczne stały się konkurencyjne w stosunku do maszyn o wzbudzeniu elektromagnetycznym, a rozpowszechniły się po zastosowaniu magnesów ferrytowych. Około 40% światowej produkcji magnesów przeznaczonych jest do wzbudzania maszyn elektrycznych, z czego 70% do maszyn stosowanych w pojazdach mechanicznych, głównie samochodach. Uwzględniając, że roczna światowa produkcja samochodów wynosi około 90 mln. sztuk, a współczesny samochód wyposażony jest przeciętnie w 35 silników elektrycznych, daje to ponad 3 miliardy maszyn rocznie.

Na drugim miejscu pod względem stosowania maszyn o magnesach trwałych jest szeroko rozumiany przemysł produkujący sprzęt gospodarstwa domowego. Kolejne miejsce zajmuje

przemysł komputerowy. Produkcja samych napędów dysków twardych jest na poziomie około 300 mln. sztuk rocznie.

Stosowane w maszynach elektrycznych magnesy trwałe można podzielić na 4 grupy: ferrytowe, Al-Ni-Co (alnico), Sm-Co oraz Nd-Fe-B (neodymowe).

Ich charakterystyczne cechy oddają krzywe magnesowania pokazane na rys. 11.



Rys. 11. Charakterystyki materiałów magnetycznych twardych,  
1 – samarowo-kobaltowe, 2 – alnico, 3 – ferryt na bazie strontu, 4 – ferryt na bazie baru.

Udział wagowy poszczególnych grup w rynku światowym wynosi: ferryty około 95%, Nd-Fe-B - ok. 3%, pozostałe magnesy ok. 2%. Pomimo wielu lat od pojawienia się na rynku magnesów z metali ziem rzadkich i opracowania w tym czasie wielu nowych materiałów magnesy ferrytowe odgrywają nadal dominującą rolę. Wynika to z około 10 razy niższej ceny jednostki energii magnetycznej (w porównaniu z magnesami Nd-Fe-B) oraz dosyć dobrej odporności na od magnesowanie. Rola magnesów Al-Ni-Co zmniejsza się wraz z rozwojem produkcji magnesów Nd-Fe-B. Zmniejsza się również rola magnesów Sm-Co, gdyż magnesy Nd-Fe-B są znacznie tańsze i mają większą energię właściwą.

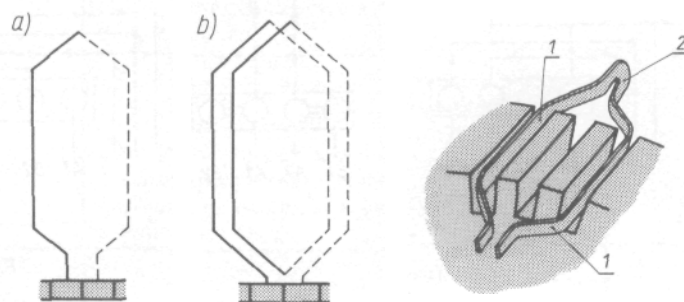
## Uzwojenia maszyn prądu stałego

Będziemy się dalej zajmować jedynie silnikami z magnesami trwałymi. Z tego względu omawiamy jedynie sposób nawinięcia uzwojeń twornika

**Uzwojenie twornika** jest umieszczone na wirniku. Od sposobu wykonania tego uzwojenia zależy wartość momentu w silniku.

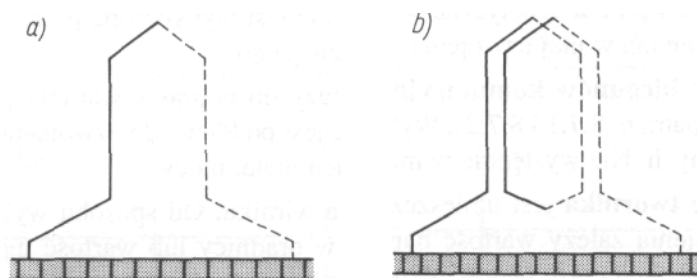
Uzwojenia tworników wykonuje się jako uzwojenia bębnowe. Uzwojenie bębnowe powstaje przez ułożenie w żłobkach twornika przewodu miedzianego jako nieprzerwanego obwodu. Zasadniczym elementem tego obwodu (uzwojenia) jest zwój składający się z dwóch boków czynnych i połączeń czołowych (rys. 12.c). Pewna liczba zwojów połączonych szeregowo i ułożonych w tej

samej parze żłobków tworzy zezwój. Zezwój może być jednozwojny (rys.12.a.) lub wielozwojny (rys. 12.b). tworząc dwie warstwy w żłobku (uzwojenie dwuwarstwowe).



Rys.12. Zezwoje uzwojenia pętlicowego: a) zezwój jednozwojny, b) zezwój dwuzwojny, c) położenie zwoju w żłobku: 1 - boki zezwoju, 2 - połączenie czołowe.

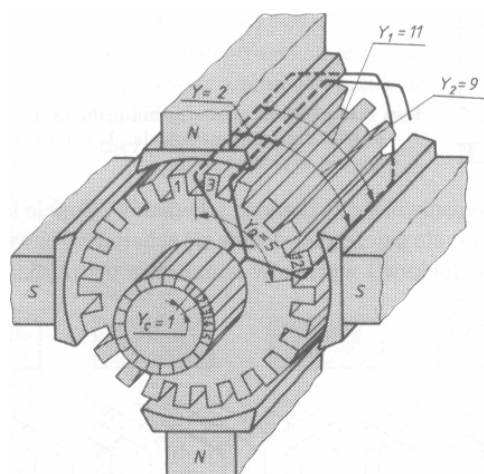
W każdym żłobku z reguły umieszcza się więcej niż 2 boki zezwojów. Zezwoje łączy się ze sobą w obwód zamknięty poprzez wycinki komutatora, dlatego każdy zezwój jest połączony z dwoma wycinkami komutatora (rys. 12 i 13), a do każdego wycinka komutatora są dołączone dwa końce dwóch różnych zezwojów. Liczba wycinków komutatora jest równa liczbie wszystkich zezwojów w maszynie.



Rys.13. Zezwoje uzwojenia falistego: a) zezwój jednozwojny, b) zezwój dwuzwojny.

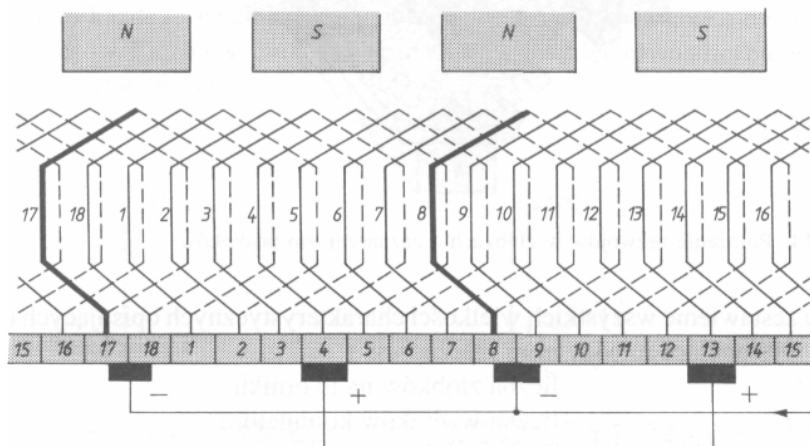
W zależności od sposobu połączenia uzwojeń z komutatorem rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje uzwojeń: pętlicowe (rys.12), faliste (rys. 8.13).

Każdy zezwój powinien mieć taką rozpiętość, aby dwa jego boki były obejmowane przez taki sam strumień magnetyczny, czyli boki powinny znajdować się w jednakowym położeniu w stosunku do sąsiednich biegunów o przeciwnych znakach.



Rys.14. Położenie zezwojów w żłobkach w relacji do biegunów.

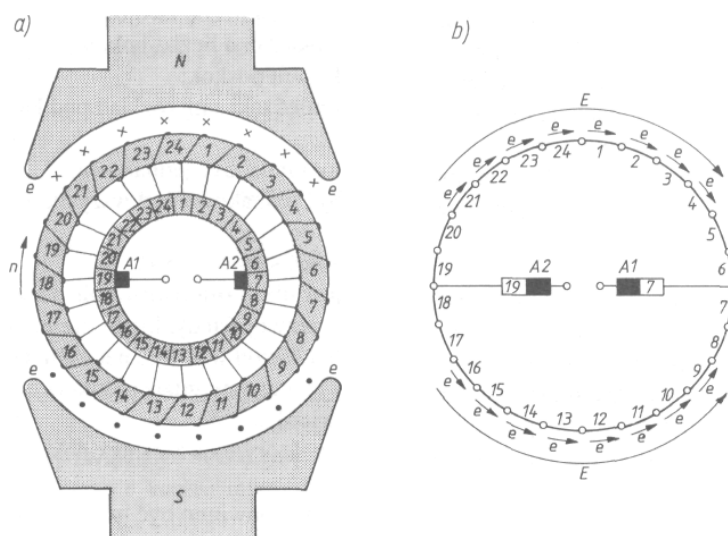
Uzwojenia przedstawia się za pomocą schematów. Istnieje kilka sposobów rysowania schematów, ale najczęściej stosuje się schematy rozwinięte na płaszczyźnie w kolejności żłobków i wycinków komutatora uporządkowanych tak samo, jak w maszynie. Na schematach rozwiniętych, cały zezwój, zawierający  $N$  - zezwojów, rysuje się w postaci dwóch boków połączonych przewodami, reprezentującymi połączenie czołowe. Linia ciągłą oznacza się boki leżące w górnej warstwie żłobka, a linią przerywaną - boki leżące w dolnej warstwie. Po stronie komutatora rysuje się połączenia końców zezwojów z poszczególnymi wycinkami, a po stronie przeciwnej rysuje się połączenia czołowe. Przykładowy schemat rozwinięty przedstawiono na rys.15.



Rys.15. Schemat rozwinięty. Uzwojenie pętlicowe proste.

### Symetria uzwojenia i ustawienie szczotek

Uzwojenie składające się z zezwojów połączonych ze sobą tworzy obwód zamknięty. Szczotki odbierające prąd dzielą uzwojenie na gałęzie równoległe (liczba gałęzi równoległych zależy od rodzaju uzwojenia). Na rysunku 16 pokazano współpracę uzwojeń, komutatora i szczotek. Na rys.16.b. podano jedynie te wycinki komutatora, na których w danym położeniu wirnika spoczywają szczotki, pozostałe wycinki nie uczestniczą w pracy uzwojenia i dlatego można je pominąć. Przy obracaniu się wirnika poszczególne zezwoje, a wraz z nimi wycinki komutatora zmieniają swoje położenie, mimo to schemat elektryczny uzwojenia nie ulega zmianom. Uzwojenie ma stałe jedną parę gałęzi równoległych.



Rys. 16. Uzwojenie maszyny dwubiegunowej: a) szkic, b) schemat poglądowy.

Aby maszyna prądu stałego mogła prawidłowo pracować, między gałęziami równoległymi uzwojenia nie mogą płynąć żadne prądy wyrównawcze. Oznacza to, że w każdej chwili napięcia

indukowane w tych gałęziach powinny być sobie równe. Uzwojenie musi spełniać tzw. warunki symetrii uzwojenia, które są następujące:

1. W każdej gałęzi równoległej musi być taka sama liczba boków.
2. Każdemu bokowi jednej gałęzi musi odpowiadać bok każdej innej gałęzi o takim samym indukowanym w nim napięciu przy takiej samej indukcji.
3. Odpowiednie boki wszystkich gałęzi równoległych powinny być rozmieszczone w jednakowych polach.

Dla symetrii muszą być spełnione dodatkowe warunki:

- **elektryczne:** każdy zezwój musi mieć taką samą liczbę zwojów, w każdym żłobku musi być taka sama liczba boków,
- **magnetyczne:** indukcja magnetyczna musi mieć taki sam rozkład pod każdym biegunem;
- **mechaniczne:** szerokość wycinków komutatora musi być jednakowa, szczelina powietrzna musi być jednakowa pod wszystkimi biegunami,

**Dla pracy maszyny prądu stałego nie jest obojętne ustawienie szczotek.** Szczotki umieszcza się tak, aby zwierzały one zezwój wtedy, kiedy nie indukuje się w nim napięcie, czyli wówczas, gdy znajduje się on w strefie neutralnej (obojętnej).