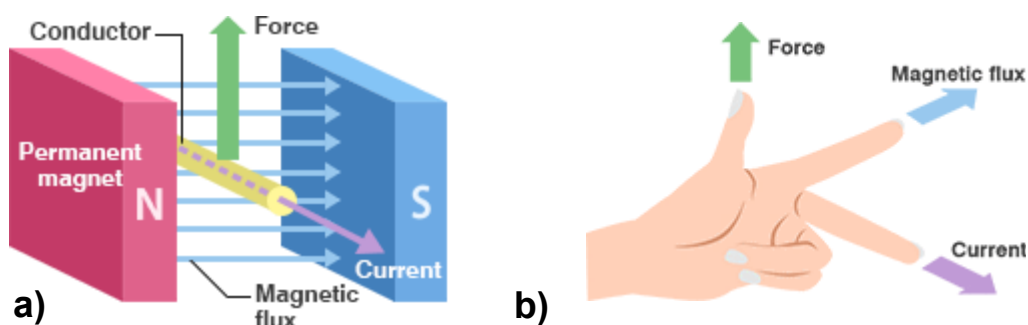


Zasada działania silników prądu stałego

Moment.

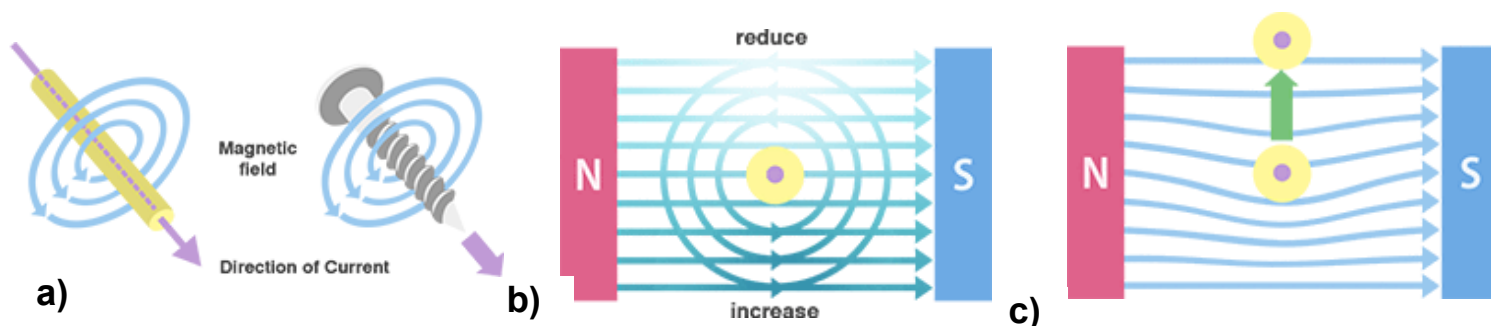
Punktem wyjścia do opisu zasady działania silników prądu stałego jest:

A. Prawo Laplace’a określające siłę działającą na przewodnik z płynącym prądem umieszczony w polu magnetycznym. Na rys.1. pokazano ilustrację prawa Laplace’a i regułę lewej dłoni (regułę Fleminga) ułatwiającą zapamiętanie kierunków oddziaływania.



Rys. 1. Ilustracja prawa Laplace’a (a) i reguły lewej dłoni (b).

Siła powstaje w wyniku oddziaływania pola magnetycznego wytworzonego przez prąd płynący w przewodzie, ze stałym polem magnetycznym (rys.2.b). (Kierunek linii pola wynika z reguły śruby prawoskrętnej rys. 2.a). W wyniku tych oddziaływań powstaje siła pokazana na rys.2.c.

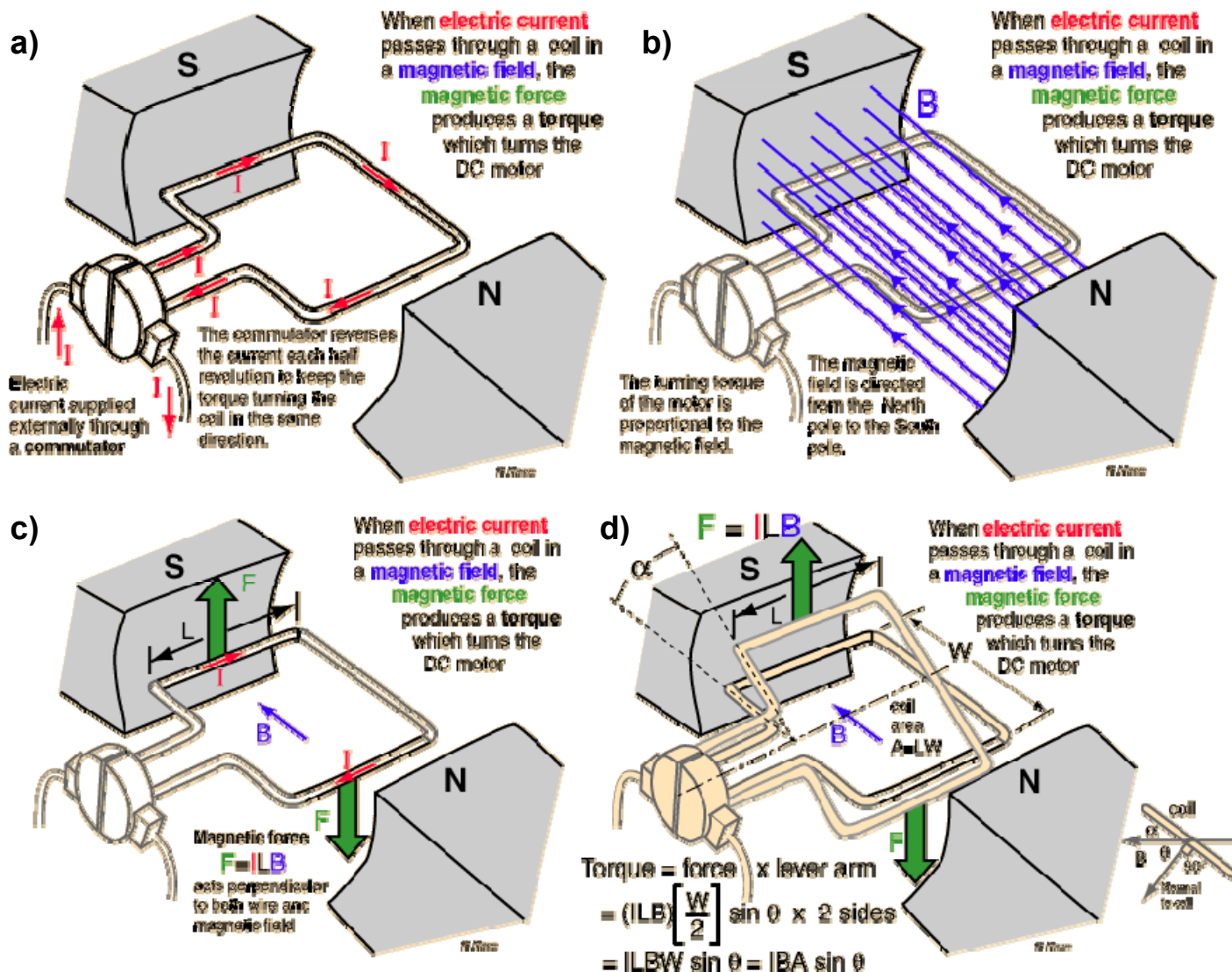


Rys.2. Przewodnik z prądem w polu magnetycznym.

Powstająca siła elektrodynamiczna (F) jest proporcjonalna do płynącego prądu (I), wielkości pola magnetycznego (indukcja B) i długości przewodnika z prądem (l).

$$F = B \cdot l \cdot I$$

Jeśli umieścimy w polu magnetycznym zamiast przewodu ramkę z płynącym prądem (rys.3.a), to z skutek oddziaływania pola wytwarzanego przez ramkę i stałego pola magnetycznego (rys.3.b) powstaje moment siły powodujący obrót ramki wokół osi obrotu (rys.3.c).



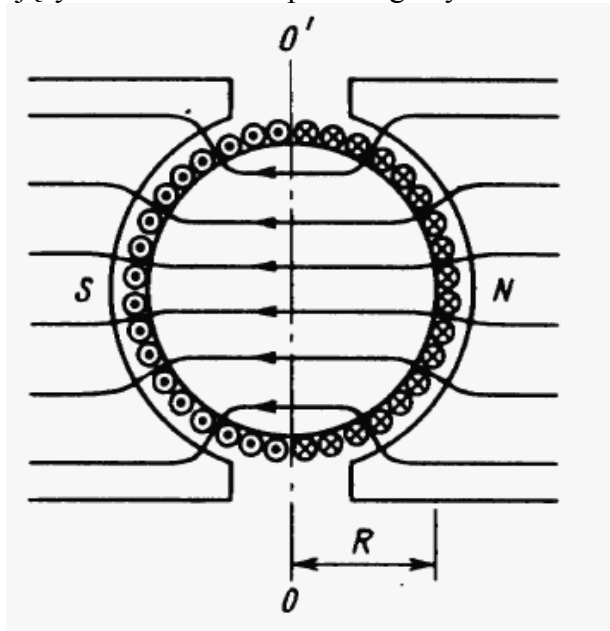
Rys. 3. Powstawanie momentu w polu magnetycznym.

Moment ten jest proporcjonalny do iloczynu wektorów siły i ramienia, więc jego wartość zmienia się, gdy zmienia ulega wartość kąta pomiędzy tymi wektorami. Przy położenie poziomym ramki, wektory siły i ramienia są prostopadłe, a więc moment obrotowy i prędkości chwilowa ramki, są największe. Gdy ramka ustawiona jest prostopadłe do linii pola magnetycznego, wektory siły i ramienia ustawione są równoległe, a wartość momentu siły działającego na ramkę spada do zera, Prędkość obracania się ramki znacznie spada i tylko dzięki bezwładności udaje się jej pokonać krytyczne prostopadłe położenie. Aby utrzymać stały kierunek obrotu ramki, w położeniu prostopadłym (za pośrednictwem komutatora) następuje zmiana kierunku przepływu prądu. W tej chwili, gdy szczotki trafiają na przerwę w komutatorze (w położeniu pionowym ramki), prąd w ramce przestaje płynąć. Dalszy obrót prowadzi do zmiany kierunku prądu w ramce, w związku z czym ramka zachowuje stały kierunek obrotu. Wartość momentu rośnie, aż do osiągnięcia przez ramkę położenia poziomego (wówczas wektory siły i ramienia są prostopadłe), poczym ponownie zaczyna maleć, aby w położeniu pionowym całkiem spaść do zera.

Moment obrotowy działający na ramkę $M = F \cdot r \cdot \sin \alpha$ gdzie:
 r - ramię siły (odległość między kierunkiem siły a osią obrotu.)
 F - wartość siły.
 α - kąt pomiędzy wektorem siły i wektorem ramienia.

Moment uzyskiwany może być zwiększona przy użyciu większej liczby przewodów umieszczonych w polu magnetycznym (wiele pętli), także przez nawinięcie dłuższych przewodów na uzwojeniu.

Rozwiązaniem jest nawinięcie wielu pętli na rdzeniu cylindrycznym wirnika, pokazane na rys.4. W celu uzyskania możliwie największej siły, duża liczba przewodów musi zostać umieszczona w polu magnetycznym. Wirnik należy umieścić w polu magnetycznym o nabiegunnikach zapewniających równomierne pole magnetyczne dla większości pętli.



Rys.4. Wirnik z wieloma pętlami.

Moment (**M**) rozwijany przez powyższy silnik

$$M = \left(\frac{Z}{\pi} \right) \cdot \Phi \cdot \frac{I}{2} \quad \text{gdzie:}$$

strumień magnetyczny (**Φ**) przenikający przez zwoje $\Phi = \pi \cdot R \cdot L \cdot B$

L - długość przewodnika

I – prąd,

B - indukcja pola magnetycznego

R - promień wirnika

Z - liczba zwojów wirnika

Oprócz prądu wszystkie wartości są stałe i możemy je zawrzeć w stałej momentu (**K_T**)

$$K_T = \left(\frac{Z}{2\pi} \right) \cdot \Phi \quad M = K_T \cdot I$$

Czyli moment silnika uzależniony jest wyłącznie od natężenia prądu w uzwojeniu wirnika.

Siła elektromotoryczna – napięcie indukowane w silniku

B . Prawo Faradaya określające napięcie wyindukowane w uzwojeniu skojarzonym ze zmieniającym się w czasie polem magnetycznym.

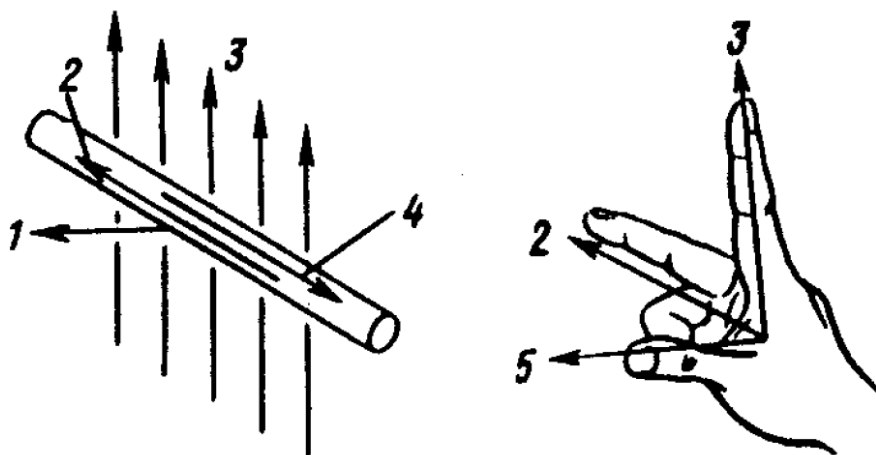
W przewodach poruszających się w polu magnetycznym w poprzek linii pola (rys.5.a.) indukuje się siła elektromotoryczna (**E**) zgodnie z zależnością. $E = v \cdot B \cdot L$

gdzie: v – prędkość przewodnika,

B – indukcja pola magnetycznego,

L – długość przewodnika

Kierunek siły określa reguła prawej dłoni (rys.5.b.)



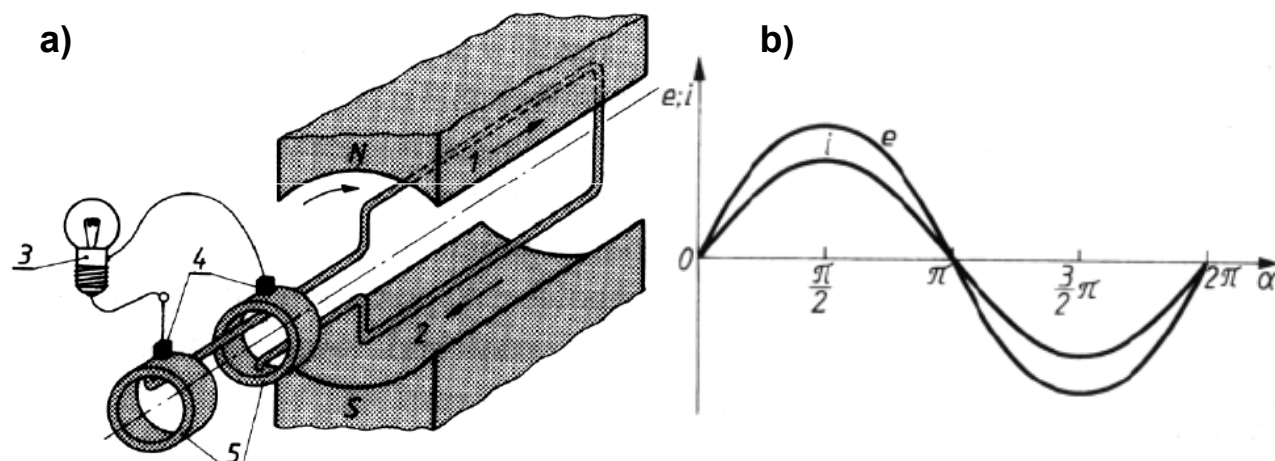
Rys. 5. Ilustracja prawa Faradaya. (1 – siła, prędkość, 2 – siła elektromotoryczna, 3 – strumień magnetyczny, 4 – prąd, 5 – przemieszczenie)

Punktem wyjścia do analizy silników komutatorowych jest prądnica prądu stałego. Gdyby w stałym polu magnetycznym umieścić obracającą się ramkę i napięcie wyprowadzić na pierścienie ślizgowe otrzymalibyśmy prądnice prądu przemiennego pokazaną na rys. 6.

Jeżeli zwoj znajdujący się w polu magnetycznym o indukcji **B** obracamy z prędkością v , to w jego bokach o długości **L** indukuje się siła elektromotoryczna o wartości:

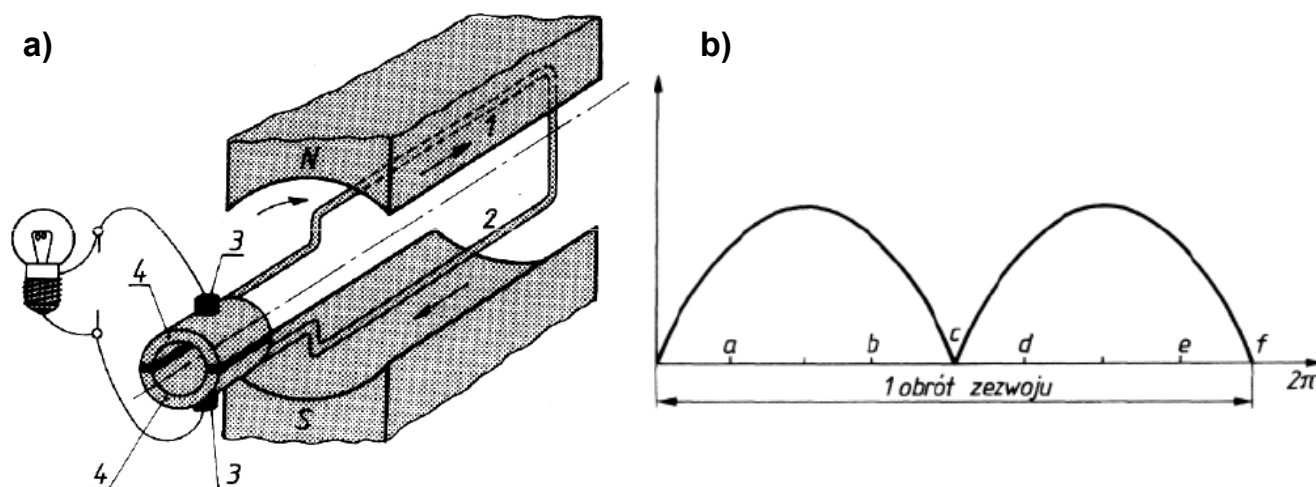
$$e = B l v \sin \alpha$$

i kierunku zgodnym z regułą prawej dłoni.



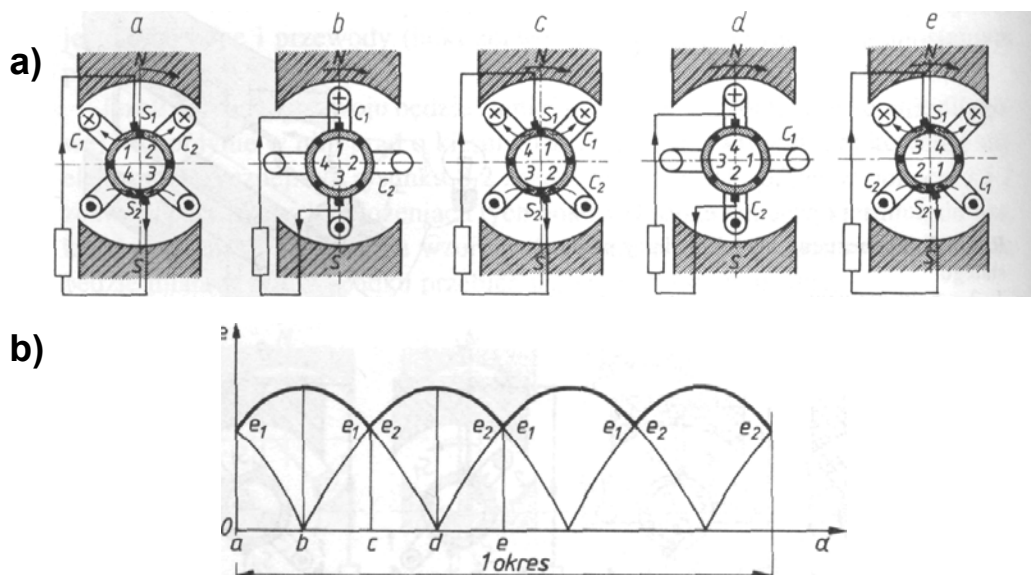
Rys.6. Uproszczony model prądnicy prądu przemiennego, gdzie:
1,2- boki zezwoju, 3 - odbiornik, 4 - szczotki, 5 - pierścienie ślizgowe.

Zamiast pierścieni użyjemy odizolowanych półpierścieni do których przyłączymy zezwój. Napięcie wyjściowe odbierane będzie za pomocą szczotek, to otrzymamy elementarną prądnicę prądu stałego. Pokazana jest na rys.7.



Rys.7. Elementarna prądnica prądu stałego, gdzie: 1, 2 - boki zezwoju, 3 - szczotki, 4 – półpierścienie komutatora.

Zwiększenie liczby pętli (zezwójów) i odpowiednio wycinków komutatora pokazane na rys.8. zmniejsza tętnienia uzyskiwanego napięcia stałego.



Rys.8. Prądnica prądu stałego w przypadku dwóch zezwojów oraz przebieg napięcia wyjściowego przy dwóch zezwojach i czterech wycinkach komutatora.

C_1, C_2 - zezwoje, 1, 2, 3, 4 — wycinki komutatora; S_1 - szczotka ujemna; S_2 - szczotka dodatnia; e_1, e_2 - SEM w zezwojach C_1, C_2 ; a, b, c, d, e - położenia zezwojów

Przez zwiększenie liczby zezwojów (pętli i odpowiednio wycinków komutatora) uzyskujemy prądnice prądu stałego pokazaną na rys.9. o ograniczonym bardzo poziomie tętnień.

W każdej pętli prąd płynie w jedną stronę pod biegunem N, a w przeciwną pod biegunem S. Wszystkie pętle połączone są szeregowo. Napięcia indukowane w poszczególnych pętlach się dodają, jak pokazano na rys.10.

Siła elektromotoryczna E_{ind} indukowana w wirniku silnika i przenoszona szczotkami wynosi.

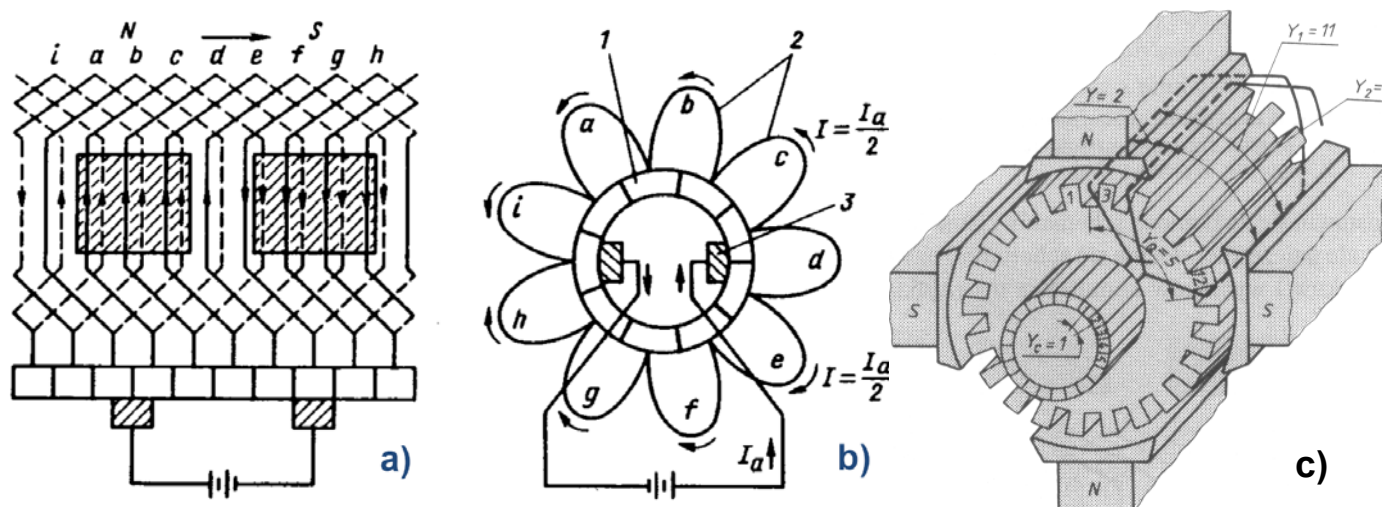
$$E_{ind} = K_E \cdot \omega \quad \text{gdzie:} \quad K_E = \left(\frac{Z}{2\pi} \right) \Phi$$

K_E - stała napięcia silnika

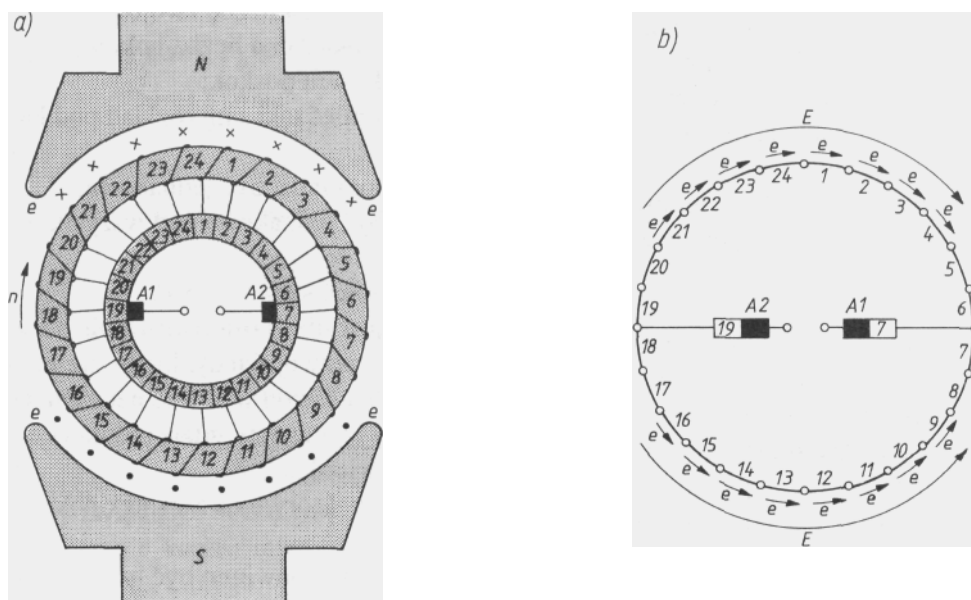
Φ - strumień pola magnetycznego przenikającego przez zezwoje

ω - kątowna prędkość wirnika,

Z - liczba zwojów wirnika.



Rys.9. Uzwojenie wielopętłowe wirnika silnika DC – schemat rozwinięty.

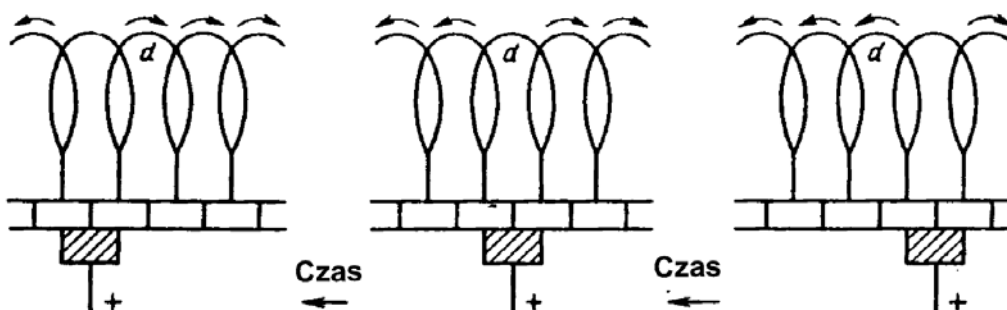


Rys.10. Uzwojenie maszyny dwubiegunowej. a) szkic połączeń. b) schemat poglądowy.

Komutacja

Moment wytwarzany przez płynący przez zezwoje (wirnika) prąd powoduje obrót wirnika. W obracających się zezwojach indukuje się napięcie dające na szczotkach wypadkową siłę elektromotoryczną, o kierunku przeciwnym do płynącego prądu (w pracy jako silnik). By stan przełączania prądu na kolejne zezwoje przy obracaniu się wirnika trwał jest potrzebny komutator. Istota komutacji pokazana jest na rys. 11. Utrzymuje on stały kierunek prądu w przewodach pod nabiegunkiem N i przeciwny pod nabiegunkiem S. Czyli siły i tym samym powstający moment jest zależne od usytuowania przestrzennego (stałego) szczotek komutatora i nabiegunków magnetycznych. Napięcie zasilania jest stałe (rozpatrujemy stan ustalony). Zmienia się jedynie kierunek prądu, zezwój po zezwoju w miarę obrotu wirnika.

Podobnie komutator wyprowadza ze wirnika indukowane napięcie będące sumą napięć indukowanych w poszczególnych zewojach w wirniku w trakcie obracania (rys. 10). Oba procesy toczą się równolegle.

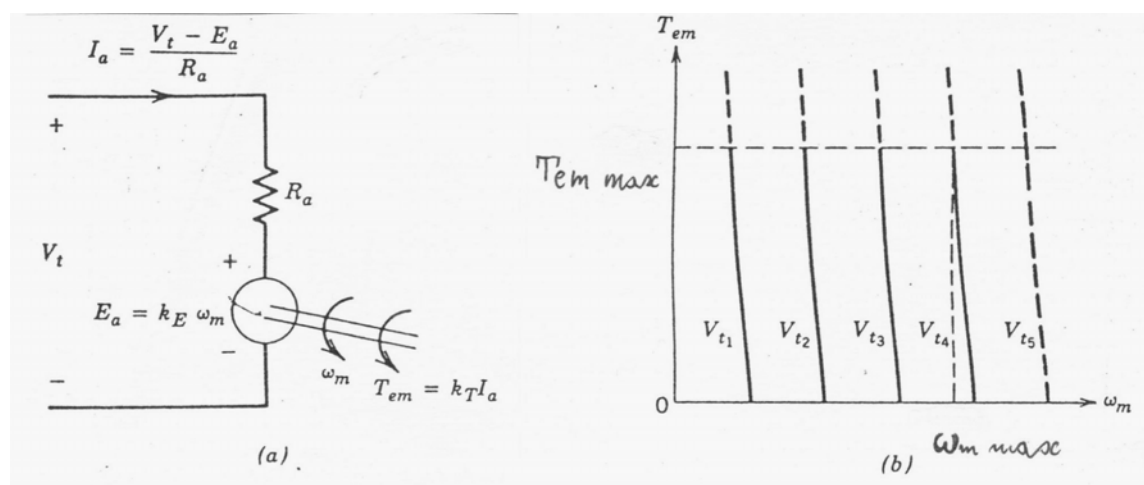


Rys.11. Ilustracja działania komutatora komutacji w silniku komutatorowym w kolejnych chwilach czasowych i obracającym wirniku.

Dalej omawiamy najpierw stan ustalony od strony zasilania i od strony obciążenia.

Model elektromechaniczny statyczny silnika DC

W silnikach DC strumień magnetyczny Φ_f wytwarzany jest w stojanie przez prąd uzwojenia wzbudzenia I_f . Rozważamy dalej silniki ze wzbudzeniem za pomocą magnesów stałych.



Rys. 12. Silnik DC z magnesami trwałymi, a) schemat zastępczy, b) charakterystyki elektro-mechaniczne.

Moment elektromagnetyczny napędowy T_{em} jest wytwarzany przez oddziaływanie strumienia magnetycznego Φ_f i prądu w uzwojeniach wirnika I_a

$$T_{em} = K_T \cdot \Phi_f \cdot I_a$$

gdzie K_T – stała momentu silnika

Siła elektromotoryczna E_{IND} indukowana w uzwojeniu wirnika obracającego się z prędkością kątową ω_m

$$E_{IND} = K_E \cdot \Phi_f \cdot \omega_m$$

gdzie K_E – stała elektryczna silnika

Dostarczana moc elektryczna P_e do silnika

$$P_e = E_{IND} \cdot I_a = K_E \cdot \Phi_f \cdot \omega_m \cdot I_a$$

i wytwarzana moc mechaniczna P_m w stanie ustalonym powinny być równe, pomijając wszystkie straty mocy,

$$P_m = \omega_m \cdot T_{em} = K_T \cdot \Phi_f \cdot \omega_m \cdot I_a = P_e$$

Stały strumień od magnesów stałych można włączyć do stałej K_E i K_T .

Z równań uzyskujemy

$$(1) \quad T_{em} = K_{Ta} \cdot I_a \quad \text{gdzie} \quad K_{Ta} = K_T \cdot \Phi_f$$

$$(2) \quad E_{IND} = K_{Ea} \cdot \omega_m \quad \text{gdzie} \quad K_{Ea} = K_E \cdot \Phi_f$$

$$(3) \quad \text{i} \quad V_t = E_a + R_a I_a$$

z bilansu mocy uzyskujemy zależność prędkości kątovej ω_m (obroty silnika) od momentu T_m (obciążenie silnika) i napięcia zasilającego silnik V_t (w stanie ustalonym).

$$\omega_m = \frac{1}{k_E} \left(V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em} \right)$$

Jak pokazano na rys. 12. b) obroty silnika ω_m zależą od momentu T_{em} ze względu na spadek napięcia w uzwojeniach silnika ($I_a R_a$). Pobierany prąd I_a zależy wprost od momentu obciążenia T_{em} . Charakterystyki mechaniczne ulegają przesunięciu wraz ze wzrostem napięcia zasilającego V_t . Prędkość obrotowa ω_m jest kontrolowana dla określonego momentu obciążenia T_{em} przez regulację napięcia zasilającego V_t .

W stanie ustalony prąd w uzwojeniu wirnika I_a nie może przekroczyć pewnej maksymalnej wartości $I_{a \max}$, co wyznacza także maksymalny moment napędowy $T_{em \max}$. Parametr ten wynika z uwarunkowań cieplnych (chłodzenie) i możliwość przemagnesowania magnesów stałych. Maksymalne prędkości w stanie ustalonym $\omega_{m \max}$ wyznaczają parametry silnika (wytrzymałość mechaniczna), stąd ograniczenie na maksymalne napięcie zasilające $V_{t \max}$.

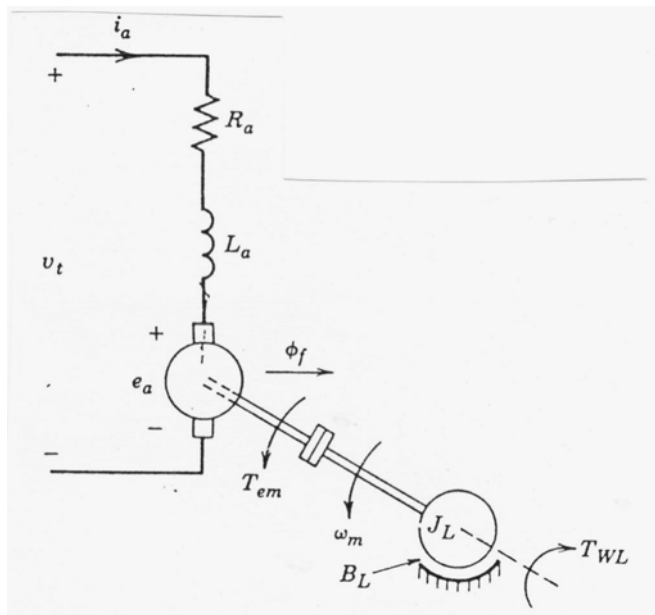
Dodatkowym ograniczeniem jest czasami wytrzymałość napięciowa konstrukcji silnika.

Naturalnym ograniczeniem jest także maksymalna dopuszczalna moc silnika P_{\max} .



Model elektromechaniczny dynamiczny silnika DC

W schemacie zastępczym silnika musimy uwzględnić rezystancję uzwojenia R_a , indukcyjność L_a , tarcie i bezwładność.



Rys.13. Równoważny model dynamiczny silnika DC (elektryczny i mechaniczny).

Równoważny schemat elektryczny pokazany na rys.13. opisany jest zależnością

$$v_t = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

a oddziaływanie momentu napędowego elektromagnetycznego T_{em} z obciążeniem opisuje

gdzie : J_L – równoważna bezwładność,

B_L – równoważne tarcie,

$T_{wz}(t)$ – równoważny moment obciążający

$$T_{em} = J_L \frac{d\omega_m}{dt} + B_L \omega_m + T_{WL}(t)$$

Silnik DC jako prądnica, hamowanie.

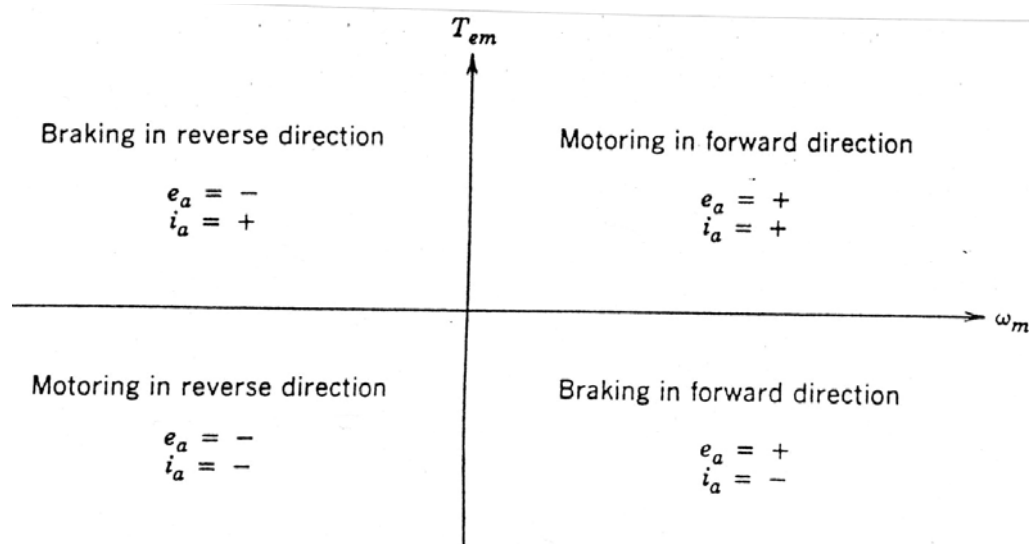
Silnik DC może być wykorzystany jako prądnica. Wykorzystuje się tę cechę w sterowaniu silników DC do uzyskania hamowania.

Przed hamowaniem wirnik silnika obraca się z prędkością kątową ω_m w strumieniu magnetycznym Φ_f . Gdy obniży się napięcie zasilania v_t poniżej wartości indukowanej siły elektromotorycznej e_a to zmieni się kierunek prądu i_a (a tym samym i momentu elektromagnetycznego T_{em}) i silnik zamienia się w prądnicę. Energia kinetyczna zamienia się w energię elektryczną przejmowaną przez źródło zasilania v_t lub wydzieloną w rezystorze R_a . W celu przyspieszenia hamowania stosuje się przyłączenie do silnika napięcia zasilającego o odwrotnej polaryzacji.

Zależność indukowanej w uzwojeniach silnika siły elektromotorycznej od kierunku prądu płynącego w uzwojeniu określa podstawowe tryby pracy silnika elektrycznego:

- praca silnikowa (w jednym lub obu kierunkach),
- praca z hamowaniem (w jednym lub obu kierunkach).

Na rys. 14 pokazano czterokwadrantową pracę silnika DC



Rys. 14. Czterokwadrantowa praca silnika DC.

Zadanie : Rozważ hamowanie silnika przez:

- odłączenie napięcia zasilającego,
- obniżenie napięcia zasilającego,
- zwarcie silnika,
- przyłączenie napięcia o odwrotnej polaryzacji.

Zadanie: Określ własności urządzenia umożliwiającego odzyskiwanie energii kinetycznej w czasie hamowania.

