

"Jeżeli mogę wytworzyć model mechanizmu to rozumiem,  
Jeżeli nie mogę - nie rozumiem."  
lord Kelvin

## 2 Podstawy fizyczne budowy i działania maszyn elektrycznych

**Maszyna elektryczna jest urządzeniem do elektromechanicznego przetwarzania energii z udziałem strumienia ładunku elektrycznego (prądu elektrycznego) i strumienia masy – „ruchu elektrycznego” i ruchu mechanicznego.**

Proces przemiany energii może zachodzić w dwóch kierunkach: maszyna elektryczna może pracować jako prądnica (*generator*) lub jako *silnik*.

**Transformator jest urządzeniem do elektromagnetycznego przetwarzania energii elektrycznej o jednym napięciu na energię o innym napięciu, bez udziału energii mechanicznej (ruchu mechanicznego).**

Proces przemiany energii w transformatorze może zachodzić w dwóch kierunkach.

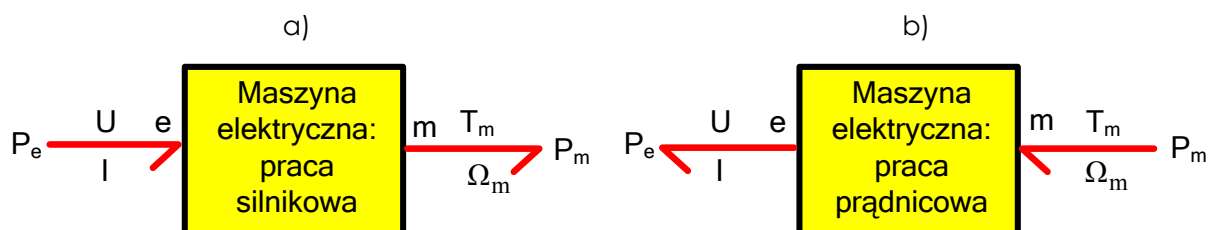
Podstawą działania i budowy maszyn elektrycznych i transformatorów są dwa odkrycia: efektu magnetycznego prądu (Hans Oersted odkrył 21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej (Michał Faraday odkrył 29 sierpnia 1831 r.).

### 2.1 Definicja maszyny elektrycznej

**Maszyna elektryczna jest przetwornikiem do elektromechanicznego przetwarzania (konwersji) energii z udziałem strumienia ładunku elektrycznego (prądu elektrycznego) – „ruchu elektrycznego” i strumienia masy – ruchu mechanicznego.**

Proces przemiany energii w maszynach elektrycznych może zachodzić w dwóch kierunkach:

- przetwarzania energii elektrycznej (EE) na mechaniczną w **silnikach** (motorach, rys. 2.1a);
- przetwarzania energii mechanicznej (EM) na elektryczną w **prądnicach** (generatorach, rys. 2.1b).



Rys. 2.1 Ogólna struktura maszyny elektrycznej i kierunki procesu przetwarzania energii:

a) praca silnikowa, b) praca prądnicowa.

Wrota „e” oraz „m” – miejsca przepływu energii/mocy odpowiednio elektrycznej i mechanicznej;  
Wielkości wrotowe/zaciskowe: P<sub>e</sub> – moc elektryczna; P<sub>m</sub> – moc mechaniczna; U – napięcie, I – prąd, T<sub>m</sub> – moment obrotowy, Ω<sub>m</sub> – prędkość kąтова.

Przyjęta konwencja strzałkowania w ujęciu grafów wiązań<sup>1</sup> oznacza: moc doptywająca do maszyny jest mocą dodatnią, a moc odpływająca – mocą ujemną.

<sup>1</sup> Grafy wiązań - metoda graficzna opisu/modelowania systemów przetwarzania energii opracowana przez H. Paintera [2, 18, 39]. Podstawy metody opisano w załączniku do

## 2.2 Zjawiska fizyczne wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych

### 2.2.1 Podstawy działania

Podstawą działania maszyn elektrycznych – procesu elektromechanicznego przetwarzania energii, najogólniej rzecz ujmując, są zjawiska związane z wzajemnym oddziaływaniem ładunków elektrycznych.

### 2.2.2 Pole elektromagnetyczne i jego wielkości charakterystyczne

Wzajemne oddziaływanie ładunków elektrycznych opisujemy wprowadzając pojęcie pola elektromagnetycznego. Przez pole elektromagnetyczne rozumiemy przestrzeń, w której na ładunek  $q$  działa siła Lorentza [**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**]:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

gdzie:

- $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  natężenie pola elektrycznego i indukcja pola magnetycznego, wielkości wektorowe zależne od miejsca i czasu obserwacji,
- $\mathbf{v}$  prędkość ładunku.

Należy zauważyć, że siła Lorentza (rów. (2.1)) jest pomostem między polem elektromagnetycznym a mechaniką. Mechanika wiąże się z ruchem masy w postaci ciała stałego, płynu lub gazu. Możemy zatem powiedzieć, że pomost ten ma charakter „elektro-magneto-mechaniczny”. Dziedziną, która to opisuje nazywamy **elektromechaniką**.

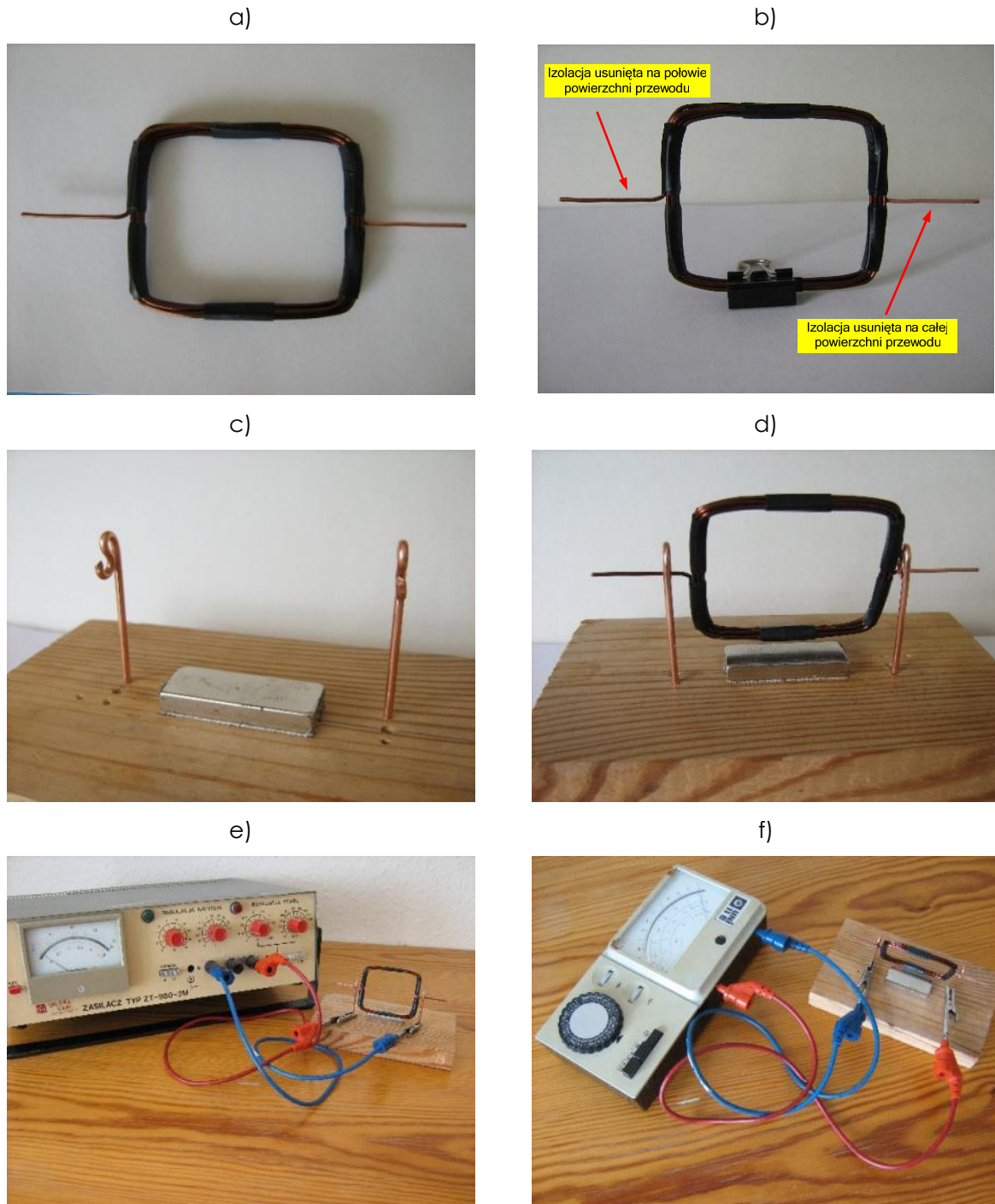
Zatem rodzą się następujące pytania:

- co można z tego zbudować?
- jak to zbudować?

Odpowiedzi na te pytania zilustrujemy posługując się prymitywnym modelem maszyny elektrycznej prądu stałego.

### 2.2.3 Prymitywna maszyna elektryczna a maszyny współczesne

Rozważymy dwa warianty prymitywnej maszyny elektrycznej o ruchu obrotowym, w których zastosujemy cykliczne przełączanie uzwojenia – **komutację prądu zasilania** maszyny. Pierwszy wariant prymitywnej maszyny elektrycznej przedstawiamy na rys. 2.2.

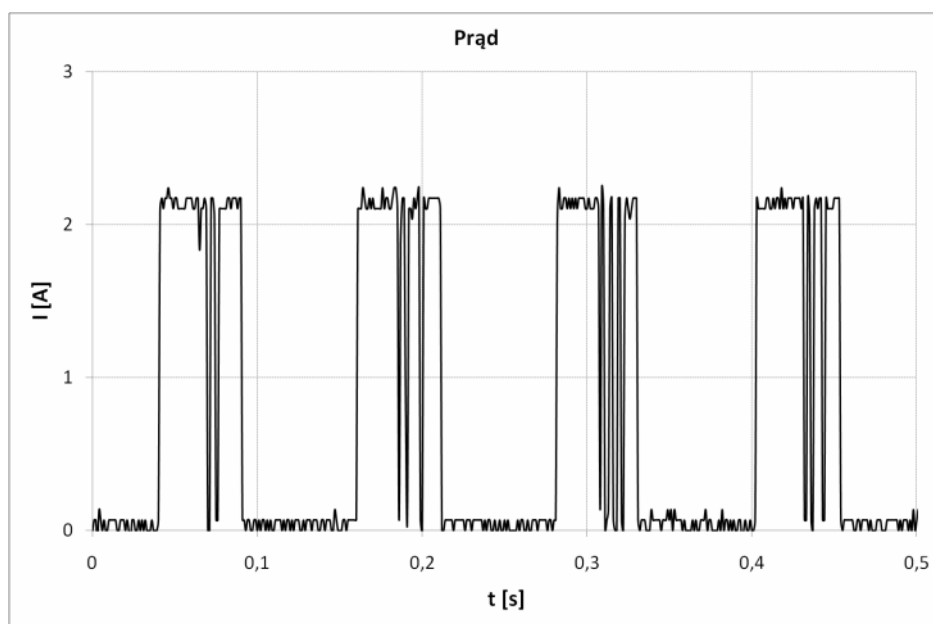


**Rys. 2.2** Prymitywny model maszyny elektrycznej prądu stałego:  
**a)** uzwojenie, **b)** miejsca usunięcia izolacji na końcach przewodów cewki, **e)** podstawa, podpory – zaciski cewki i magnes trwały, **d)** maszyna złożona, **e)** praca silnikowa **f)** praca prądnicowa

Maszyna (rys. 2.2) składa się z cewki (uzwojenia), magnesu trwałego i dwóch podpór oraz podstawy. Cewkę wykonujemy z izolowanego przewodu miedzianego, nadając jej kształt ramki. Na podstawie mocujemy magnes trwały, a cewkę ustawiamy na podporach wykonanych z przewodu miedzianego z usuniętą izolacją.

## Badanie pracy silnikowej maszyny

Opis przygotowania cewki do komutowania przepływu prądu pokazano na rys. 2.2b. Usunięcie izolacji na połowie powierzchni jednej końcówki cewki spowoduje przepływ prądu przez cewkę tylko w czasie połowy jej pełnego obrotu – efektem jest działanie siły Lorentza w tym samym kierunku. Prąd w cewce będzie miał przebieg o charakterze impulsowym – ilustruje to pomierzony przebiegu prądu w cewce (rys. 2.3).



Rys. 2.3 Pomierzony przebieg prądu cewki maszyny prymitywnej (rys. 2. 9)

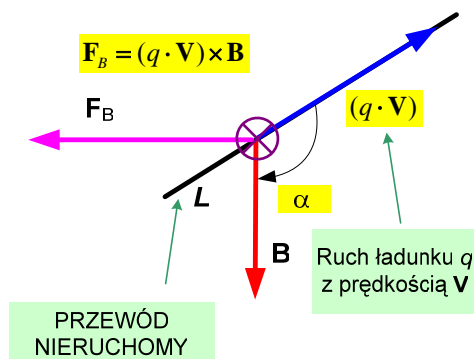
Zasilacz wymusi w cewce przepływ prąd o natężeniu  $I$ . Jest on miarą ładunków poruszających się wzdłuż boków cewki z prędkością  $\mathbf{v}$ , czyli wielkości  $q\mathbf{v}$  w rów. (2.1). Efektem przepływu prądu jest siła Lorentza  $\mathbf{F}$ , która działa na płynący ładunek w cewce prostopadle do płaszczyzny leżącej na wektorze prędkości ładunku  $\mathbf{v}$  i wektorze indukcji  $\mathbf{B}$  – zgodnie z regułą iloczynu wektorowego  $q(\mathbf{v}\times\mathbf{B})$  (rys. 2.4). Na rys. 2.4, odpowiednio przekształcając rów. (2.1), podano zależności na siłę Lorentza<sup>2</sup>.

Siła Lorentza działa na oba boki cewki – powstaje zatem moment obrotowy o naturze elektromagnetycznej, który wymusi ruch obrotowy cewki (ilustruje to plik video: [model.mps.1.avi](http://model.mps.1.avi) – adres podany w **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** do e-skryptu)<sup>3</sup>. Ze względu na nierównomierny rozkład indukcji pola magnesu trwałego w obszarze cewki wartości siły Lorentza nie są jednakowe.

<sup>2</sup> Pytanie: co wykonują pracę: siła Lorentza, czy płynący ładunek?

<sup>3</sup> Analogiczne filmy dostępne są w Internecie na stronie <http://www.youtube.com/>. Wystarczy wpisać do wyszukiwarki „electric motor”.

**GENEROWANIE SIŁY LORENTZA:**  
 efekt ruchu elektrycznego w polu magnetycznym



**Założenie: rozkład indukcji jednorodny wzdłuż prostego przewodu oraz kąt  $\alpha = 90^\circ$**

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \rightarrow \quad F = q \cdot v \cdot B$$

$$v = \frac{L}{t} \quad \rightarrow \quad F_B = \left( Q \cdot \frac{L}{t} \right) \cdot B$$

$$I = \frac{q}{t} \quad \rightarrow \quad \boxed{F = (I \cdot L) \cdot B}$$

Rys. 2.4 Wyznaczenie wektora siły Lorentza  $F$  działającej na ładunek  $q$  poruszający się z prędkością  $v$  wzdłuż przewodu o długości  $L$  umieszczonej w polu o indukcji  $B$

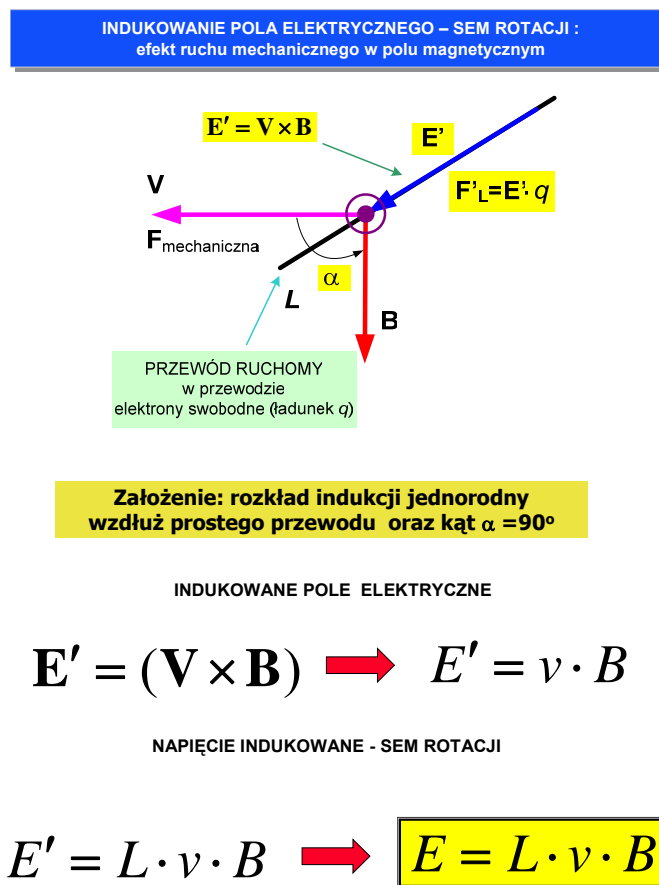
**Uwaga:**

- cewka wymaga ręcznego popchnięcia – ważny jest kierunek wirowania cewki!;
- aby siła Lorentza działała na boki cewki w tym samym kierunku konieczne jest odpowiednie sterowanie - komutowanie kierunkiem przepływu prądu przez cewkę, czyli cykliczne przetaczanie zacisków cewki względem zacisków źródła prądu. Jest to warunek wymuszenia jednokierunkowego ruchu obrotowego;
- w przypadku jednokierunkowego przepływu prądu przez cewkę – braku komutacji – średnia wartość moment jest równa zero: maszyna nie wytwarza użytecznej mocy mechanicznej.

**Badanie pracy prądnicowej maszyny**

Po podłączeniu woltomierza do szczotek i wymuszeniu ruchu obrotowego cewki (ręczne popchnięcie cewki) zaobserwujemy wychylenie wskazówki miernika. Wychylenie jest efektem przepływu prądu w obwodzie cewka-miernik, który wymusi SEM indukowaną w cewce polem magnesu. (ilustruje to plik video: [model\\_mps\\_2.avi](#))

– adres podany w załączniku do e-skryptu). Na rys. 2.5, odpowiednio przekształcając równ. (2.4), podano zależności na indukowaną SEM. Ze względu na to, że jej źródłem jest ruch mechaniczny – ruch obrotowy – nazywamy ją także **SEM rotacji**<sup>4</sup>.



Rys. 2.5 Wyznaczenie wektora pola elektrycznego  $E'$  oraz indukowanej SEM rotacji  $E$  dla przypadku przewodu o długości  $L$  poruszającego się prędkością  $v$  w polu o indukcji  $B$

Wnioski:

- ruch ładunku (ruch elektryczny) w polu magnetycznym wymusza ruch mechaniczny (wirowanie cewki) – maszyna pracuje jako silnik;
- ruch mechaniczny cewki (wirowanie cewki) w polu magnetycznym indukuje pole elektryczne - napięcie na zaciskach cewki (SEM rotacji), które może wymusić przepływ prądu - maszyna pracuje jako prądnica;
- maszyna elektryczna jest maszyną odwracalną.

Podstawową wadą maszyny (rys. 2.2) jest wykorzystanie jej uzwojenia – zużytej miedzi do jej budowy – tylko w ciągu połowy obrotu (połowy jednego cyklu pracy).

<sup>4</sup> Powstaje pytanie: gdzie jest źródło mocy/energii w obwodzie elektrycznym?

**Materiały do nauczania:**

- [1] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. <http://www.eecs.mit.edu/>
- [2] 6.061 / 6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/ Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>
- [3] 6.685 Electric Machines (Graduate Courses)  
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>
- [4] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Physics.  
<http://web.mit.edu/physics/>
- [5] 8.02 Electricity and Magnetism (freshman physics class in electromagnetism, complete set of videotaped lectures)  
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/CourseHome/index.htm>
- [6] Ronkowski M.: MASZYNY ELEKTRYCZNE (Kier. Energetyka). Materiały pomocnicze.  
<http://www.ely.pg.gda.pl/e-mechatronika/index.php?strona=dydaktyka>