

# WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA

INNOWACYJNY PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI  
W SZKOŁACH PONADGIMNAZJALNYCH

Moduł dydaktyczny: fizyka - informatyka

## Magnetyzm, indukcja elektromagnetyczna

Grzegorz F. Wojewoda

Człowiek - najlepsza inwestycja



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tytuł: *Magnetyzm, indukcja elektromagnetyczna*

Autor: *mgr Grzegorz F. Wojewoda*

Redaktor merytoryczny: *dr hab. inż. prof. WWSI Zenon Gniazdowski*

Materiał dydaktyczny opracowany w ramach projektu edukacyjnego  
*WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.*  
*PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI*  
*Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH*

www.wlf.wysi.edu.pl

wlf@wysi.edu.pl

Wydawca: Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki  
ul. Lewartowskiego 17, 00-169 Warszawa  
www.wysi.edu.pl  
rektorat@wysi.edu.pl

Projekt graficzny: *Maciej Koczanowicz*

Warszawa 2013

Copyright © Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki 2013  
Publikacja nie jest przeznaczona do sprzedaży

*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## MODUŁ 11

# MAGNETYZM, INDUKCJA ELEKTROMAGNETYCZNA

→ FIZYKA – ZAKRES ROZSZERZONY

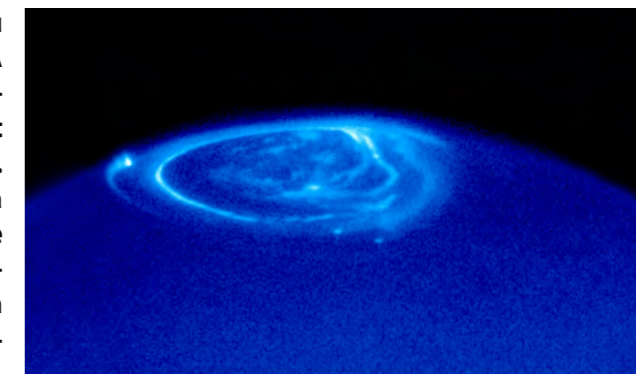
OPRACOWANE W RAMACH PROJEKTU:  
WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.  
PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI  
Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH

### Temat 1

#### Pole magnetyczne i jego źródła

#### Wstęp

Przeglądając zasoby fotografii kosmosu na stronach internetowych ESA oraz NASA można znaleźć fotografie planet Układu Słonecznego. Na fotografiach niektórych planet można dostrzec zjawisko zórz polarnych (rys. 11.1.). Również na Ziemi takie zjawisko można dostrzec. W sprzyjających warunkach także z terenu Polski. W treści tego tematu znajdziecie odpowiedź na pytanie co jest źródłem pola magnetycznego, które jest przyczyną powstawania zórz polarnych.

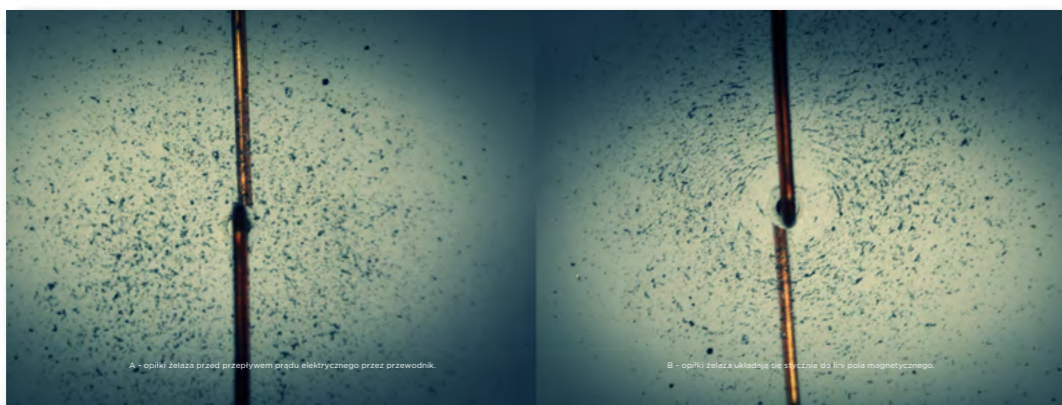


Rys. 11.1.

W życiu codziennym spotykamy się z wieloma przykładami zastosowania różnych źródeł pola magnetycznego. Drzwi wejściowe do wielu budynków mieszkalnych można otworzyć po uruchomieniu umieszczonego w nich elektromagnesu. Drzwi lodówki ściśle przylegają do niej dzięki zastosowaniu magnesów umieszczonych wewnątrz gumowej uszczelki. Do orientacji w terenie może służyć kompas dzięki istnieniu pola magnetycznego wytwarzanego przez Ziemię. Wymienione powyżej źródła pola magnetycznego mają wspólną cechę. Wewnątrz struktury tych źródeł znajdują się poruszające się ładunki elektryczne. Korzystając z przybliżenia fizyki klasycznej można powiedzieć, że:

**Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne.**

Przykładem poruszających się ładunków elektrycznych jest prąd elektryczny. Wokół przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny powstaje pole magnetyczne. Sprawdźmy na początek pole magnetyczne powstające wokół przewodnika prostoliniowego. Na rysunku 11.2. przedstawiono układ linii pola magnetycznego wokół przewodnika prostoliniowego. Jak widać na fotografii linie pola magnetycznego tworzą układ współśrodkowych okręgów. Igła magnetyczna ustawiła się stycznie do linii pola magnetycznego. Wielkością fizyczną, za pomocą której będziemy charakteryzować pole magnetyczne jest in-



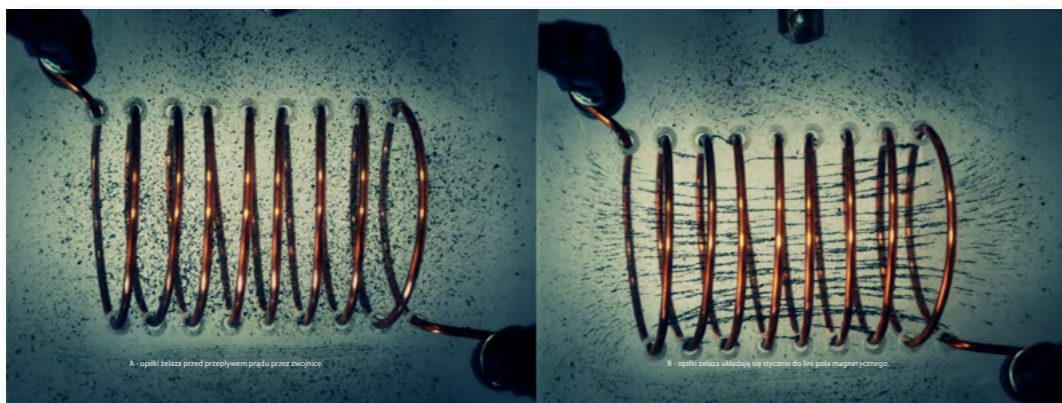
Rys.11.2. Linie pola magnetycznego wokół przewodnika prostoliniowego.

dukacja magnetyczna. Wektor indukcji magnetycznej jest styczny do linii pola magnetycznego. Wartość indukcji magnetycznej pola w odległości  $r$  od długiego prostoliniowego przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu  $I$  można obliczyć ze wzoru:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

gdzie:  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni, Umawiamy się że zwrot linii pola magnetycznego ustala reguła prawej dłoni (Rys. 11.3.). Prawa dłoń trzyma przewód z prądem w taki sposób, że kciuk wskazuje kierunek przepływu prądu przez przewodnik. Pozostałe palce wskazują zwrot linii pola magnetycznego.

Gdy długi metalowy drut nawiniemy na rurkę wykonaną z izolatora, to powstanie zwojnica (lub inaczej cewka indukcyjna). Drut powinien być pokryty warstwą izolatora, aby prąd płynął wzdłuż przewodnika, a nie pomiędzy zwojami. Na rysunku 11.4. przedstawiono układ linii pola magnetycznego wokół zwojnicy, przez którą płynie prąd elektryczny. Podobnie jak poprzednio igła magnetyczna ustawia się stycznie do linii pola magnetycznego. Wartość wektora indukcji magnetycznej wewnątrz zwojnicy



Rys.11.4. Linie pola magnetycznego wokół zwojnicy.



Rys. 11.3. Ilustracja reguły prawej dłoni.

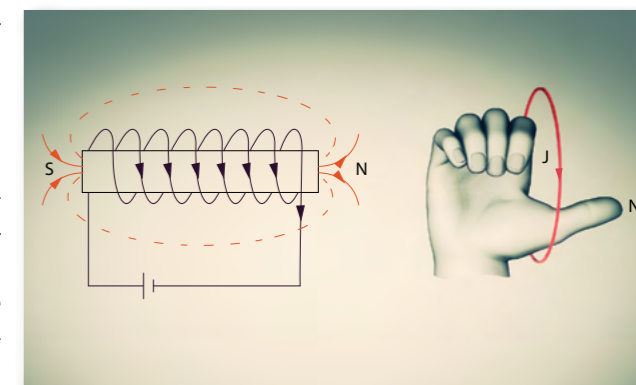
o długości  $l$  posiadającej  $N$  zwojów, w której płynie prąd o natężeniu  $I$  można obliczyć ze wzoru:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{l}$$

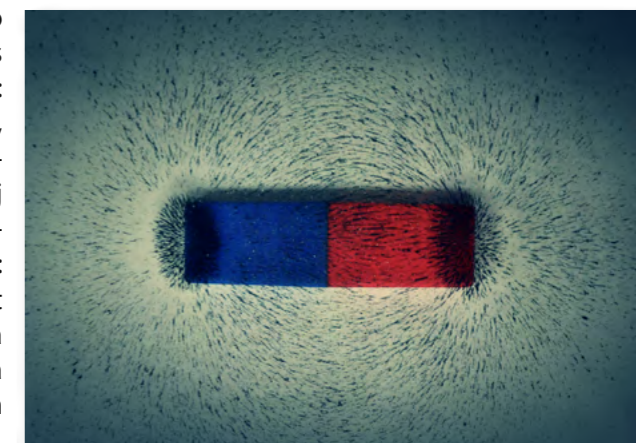
Zwrot linii pola magnetycznego ustala reguła prawej dłoni (Rys. 11.5.). Zaciśnięta prawa dłoń obejmuje cewkę indukcyjną, przez uzwojenia której płynie prąd elektryczny. Odgięty kciuk wskazuje położenie bieguna N pola magnetycznego powstającego wokół zwojnicy.

Można zauważyć, że kształt linii pola magnetycznego powstającego wokół zwojnicy jest bardzo podobny do kształtu pola magnetycznego wytwarzanego przez sztabkę magnesu trwałego (Rys. 11.6.). Jak łatwo zauważyć nasz magnes sztabkowy posiada dwa bieguny magnetyczne: N oraz S. Gdy podzielimy taki magnes na kawałki, to otrzymamy szereg magnesów dwubiegunowych. Dlaczego tak się dzieje? Poznane do tej pory pola grawitacyjne oraz elektryczne posiadały źródła w postaci pojedynczego obiektu: masę lub ładunek elektryczny. Natomiast nawet pojedynczy poruszający się elektron wytwarza wokół siebie pole magnetyczne, które posiada dwa bieguny magnetyczne. Oczywiście elektron opisany zgodnie z przybliżeniem fizyki klasycznej. Magnes trwały stanowi namagnesowany ferromagnetyk. Wewnątrz ferromagnetyków znajdują się obszary sieci krystalicznej nazywane domenami magnetycznymi. W obszarze danej domeny magnetycznej pola elektryczne wytwarzane przez pojedyncze elektrony są uporządkowane. Można sobie wyobrazić, że domeny magnetyczne są mikromagnesikami wewnątrz ferromagnetyków. Ale pola magnetyczne poszczególnych domen nie muszą być uporządkowane. Porządkowanie pól magnetycznych poszczególnych domen następuje dopiero podczas magnesowania próbki ferromagnetyka. Dzieląc magnes trwały na kawałki otrzymujemy fragmenty zawierające w sobie bardzo duże ilości domen magnetycznych, więc otrzymamy magnes dwubiegunowy.

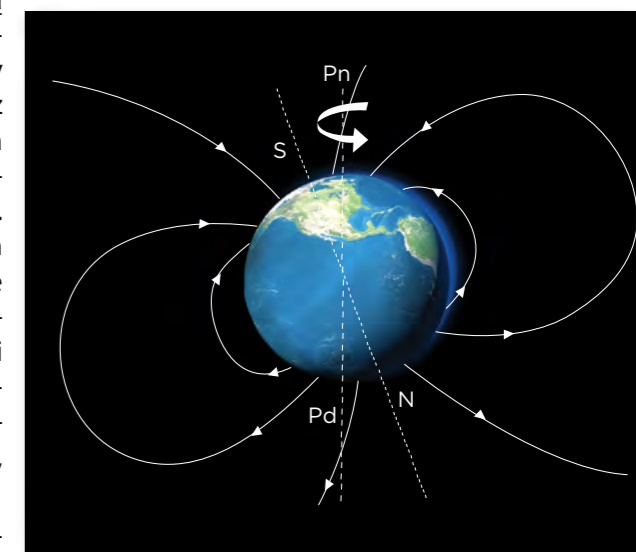
Nasza planeta jest olbrzymim magnesem. Ciągłe nie wiemy, jaki jest dokładnie mechanizm powstawania pola magnetycznego wokół Ziemi. Ale sądzimy, że musi on mieć związek z płynnymi warstwami pod powierzchnią Ziemi. Planety posiadające płynne wnętrza również wytwarzają pole magnetyczne czego dowodem są zorze polarne. Z dużym przybliżeniem można sobie wyobrazić, że wewnątrz Ziemi znajduje się ogromny magnes (Rys. 11.7.). Oś tego magnesu jest nachylona pod pewnym kątem względem osi obrotu Ziemi. Zgodnie z przyjętą umową linie pola magnetycznego wychodzą



Rys. 11.5. Schemat ustalania zwrotu linii pola magnetycznego za pomocą reguły prawej dłoni.



Rys. 11.6. Pole magnetyczne wokół magnesu sztabkowego.



Rys. 11.7. Pole magnetyczne wokół Ziemi.

z bieguna N, a wchodzi do bieguna S. Oznacza, to że w pobliżu północnego bieguna geograficznego znajduje się południowy biegun magnetyczny. Bieguny ziemskiego pola magnetycznego przemieszczają się. Co mniej więcej milion lat następuje przemagnesowanie ziemskiego pola magnetycznego. Zmiany biegunów pola magnetycznego obserwuje się również na Słońcu.

**Podsumowanie**

Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne. Warto prześledzić poniższą animację.

*Patrz Animacja: Pole magnetyczne wokół różnych źródeł.*

**Temat 2**

**Ruch cząstki naładowanej w polu magnetycznym**

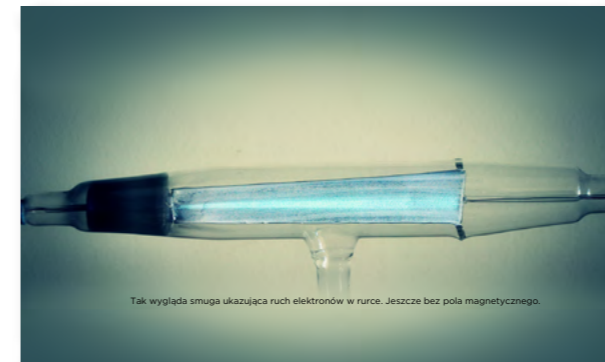
**Wstęp**

**W roku 2013 naukowy świat ekscytował się odkryciem cząstki, która odpowiada za nadawanie cząstkom elementarnym masy – bozonu Higgsa. Odkrycia tego dokonano dzięki użyciu Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC zainstalowanego w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Genewie. W tunelu LHC naładowane cząstki osiągają olbrzymie energie poruszając się po okręgu o średnicy 27 km (Rys. 11.8.). Ruch cząstek odbywa się po okręgu dzięki oddziaływaniu z polem magnetycznym.**



Rys.11.8. Wnętrze tunelu LHCw CERN pod Genewą.

Pole magnetyczne różni się od pól elektrycznego oraz grawitacyjnego. Jak zauważyliśmy wielkość pola magnetycznego w przypadku przewodnika z prądem maleje wraz z odległością od źródła. Natężenia pól grawitacyjnego oraz elektrycznego maleją z kwadratem odległości od źródła. Na naładowaną cząstkę w polu elektrycznym oraz na masę w polu grawitacyjnym siły pól działają wzdłuż linii tych pól. W przypadku pola magnetycznego jest inaczej. Aby pole magnetyczne zaczęło działać siłą na naładowaną cząstkę musi się ona poruszać. Przeprowadźmy następujące doświadczenie.



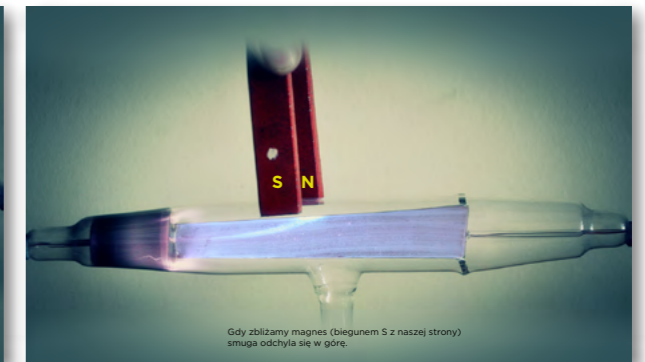
Rys.11.9a. Badanie ruchu elektronów w polu magnetycznym.

**Doświadczenie 1**

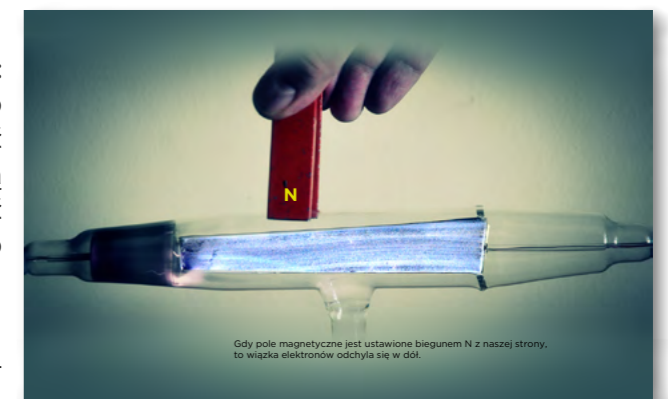
Do wykonania doświadczenia potrzebne będą: magnes trwały w kształcie podkowy (jako źródło pola magnetycznego, które będziemy uważać za jednorodne), rurka próżniowa z umieszczoną płytką pokrytą substancją, która będzie świecić pod wpływem strumienia elektronów oraz źródło wysokiego napięcia (induktor).

**Przebieg doświadczenia**

Rurkę podłączamy do źródła napięcia. Zauważamy ślad pozostawiony na płytce przez poruszające się elektrony (rys. 11.9 a)). Gdy ustawimy



Rys.11.9b. Badanie ruchu elektronów w polu magnetycznym.



Ryc. 11.9c. Badanie ruchu elektronów w polu magnetycznym.

magnes w taki sposób, że początkowy wektor prędkości elektronów jest prostopadły do linii pola magnetycznego, to zauważymy, że tor elektronów odchyła się w górę lub w dół (Rys. 11.9 b) i c)).

Przebieg doświadczenia można znaleźć w pliku:

**Patrz: Doświadczenie 1**

Na naładowaną cząstkę poruszającą się w polu magnetycznym działa siła Lorentza. Wartość siły Lorentza można obliczyć ze wzoru:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

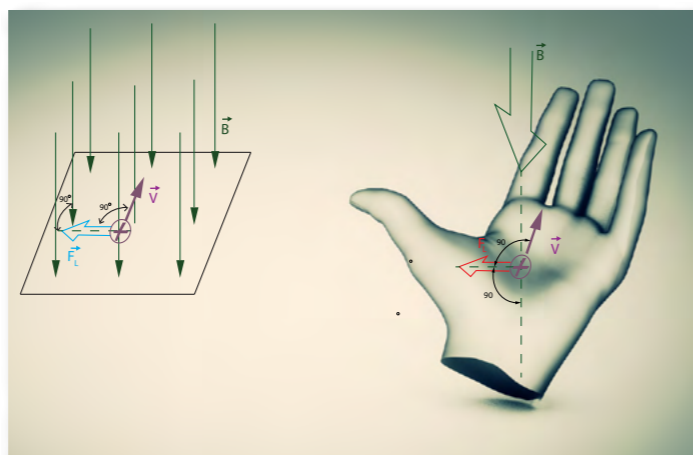
gdzie:  $q$  – ładunek cząstki,

$v$  – wartość prędkości cząstki,

$B$  – wartość indukcji magnetycznej pola,

$\alpha$  – kąt między kierunkiem wektora prędkości oraz kierunkiem linii pola magnetycznego

Kierunek siły działającej na naładowaną cząstkę poruszającą się w polu magnetycznym jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunki wektorów prędkości cząstki  $\vec{v}$  oraz indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  (Rys. 11.10). Zwrot siły Lorentza może ustalać reguła lewej dłoni. Pole magnetyczne wbija się w otwartą dłoń, której wyprostowane cztery palce wskazują kierunek i zwrot wektora prędkości cząstki. Wówczas odgięty kciuk wskazuje kierunek i zwrot wektora siły Lorentza działającej na cząstkę dodatnią.



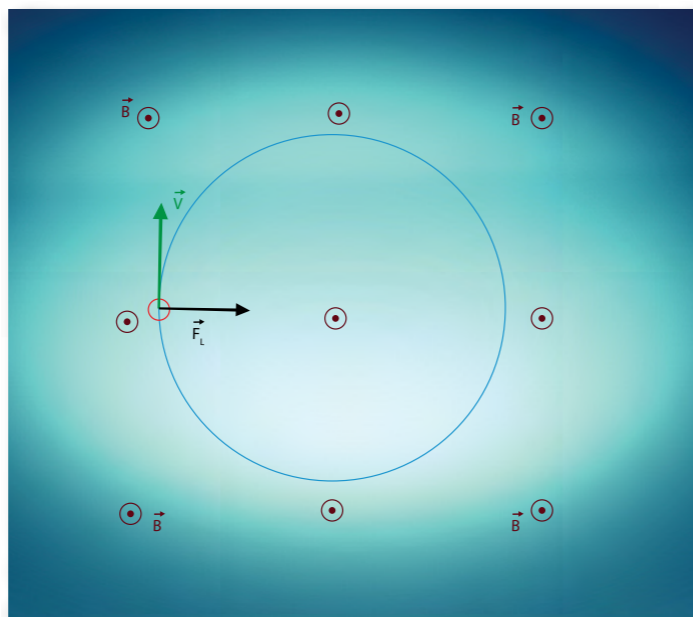
Rys. 11.10. Reguła lewej dłoni

Gdy cząstki naładowane będą kierowane do obszaru jednorodnego pola magnetycznego wzdłuż linii tego pola, to nie będzie działać na nie siła Lorentza. Dalszy ruch będzie ruchem jednostajnym po linii prostej wzdłuż linii pola magnetycznego. Gdy początkowy kierunek wektora prędkości cząstek będzie prostopadły do kierunku linii pola magnetycznego, to działająca na cząstkę siła Lorentza będzie pełniła rolę siły dośrodkowej. Dalszy ruch będzie ruchem jednostajnym po okręgu. Gdy początkowy kierunek prędkości cząstki będzie inny od wymienionych powyżej, ruch cząstki będzie złożeniem ruchu jednostajnego po okręgu oraz jednostajnego po linii prostej – czyli będzie linią śrubową.

Rozważmy ruch naładowanej cząstki skierowanej pod kątem prostym do linii pola magnetycznego (Rys. 11.11.). Na taką cząstkę działa siła Lorentza, której kierunek jest prostopadły do wektora prędkości cząstki. Siła Lorentza pełni w tym przypadku rolę siły dośrodkowej. Można to zapisać w sposób następujący:

$$F_L = F_d$$

Więc: 
$$q \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{R}$$



Rys. 11.11. Siła Lorentza powoduje ruch cząstki naładowanej po okręgu.

Po podzieleniu obu stron równania przez  $v$ , otrzymujemy:

$$q \cdot B = \frac{m \cdot v}{R} \quad *$$

Z wyrażenia tego wynika, że im większa jest wartość prędkości cząstki poruszającej się w polu magnetycznym, tym większy jest promień okręgu, po którym się ona porusza.

Sprawdźmy, od czego zależy okres obiegu cząstki podczas ruchu po okręgu. Przypominamy, że wartość prędkości liniowej w ruchu po okręgu wyraża się zależnością:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$$

Wstawiając to wyrażenie do wzoru oznaczonego \* otrzymujemy:

$$q \cdot B = \frac{2\pi \cdot m \cdot R}{R \cdot T}$$

Więc okres obiegu cząstki:

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}$$

Z powyższego wzoru wynika, że okres obiegu cząstki naładowanej, poruszającej się po okręgu w polu magnetycznym, nie zależy ani od wartości prędkości cząstki, ani promienia okręgu, po którym się ona porusza. Ta cecha umożliwiła zbudowanie akceleratorów cząstek. Ale w urządzeniach tych pole magnetyczne nie rozpędza cząstek. Ono tylko powoduje ich ruch po okręgach.

Przykładem akceleratora cząstek jest Large Hadron Collider (LHC) w CERN-ie. Aby w pełni zrozumieć jego działania musielibyśmy odwoływać się do praw fizyki relatywistycznej. Rozpędzone cząstki poruszają się w tym urządzeniu z prędkościami o wartościach porównywalnych z wartością prędkości światła. Na tym etapie poznawania praw przyrody wystarczy nam stwierdzenie, że promień okręgu, po którym poruszają się w LHC rozpędzone cząstki pozostaje stały. Wystarczy więc, że tylko tam, gdzie poruszają się cząstki będzie istniało pole magnetyczne. Dlatego LHC może mieć kształt zbliżony do okręgu.

W poniższym pliku przedstawiono mechanizm działania cyklotronu – urządzenia służącego do rozpędzania naładowanych cząstek.

**Patrz Animacja: Ruch cząstki w polu magnetycznym**

**Podsumowanie**

Siła Lorentza to siła działająca na naładowaną cząstkę poruszającą się w polu magnetycznym. Wartość siły Lorentza można obliczyć ze wzoru:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Gdy siła Lorentza jest jedyną siłą działającą na poruszającą się cząstkę, to może ona poruszać się: po linii prostej, po okręgu lub po linii śrubowej.

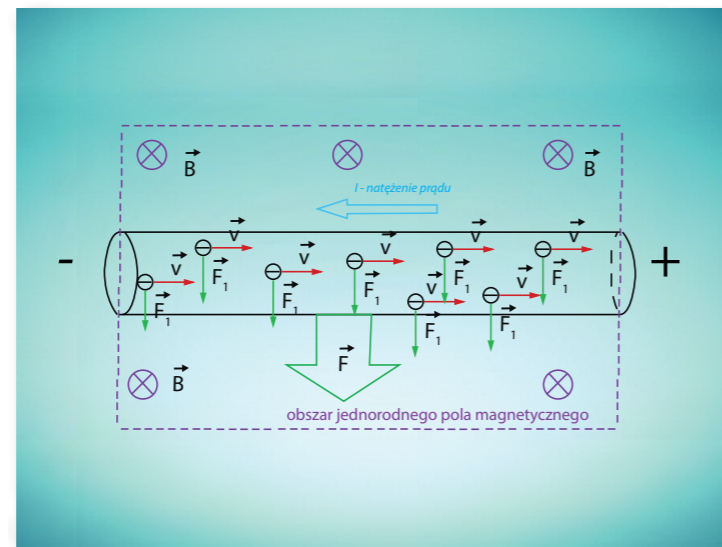
## Temat 3

## Siła elektrodynamiczna. Silniki elektryczne

## Wstęp

W temacie tym wyjaśnimy w jaki sposób pole magnetyczne działa na przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny. Silniki elektryczne to urządzenia, które wykorzystują działanie pola magnetycznego na przewodnik w którym płynie prąd elektryczny.

Gdy elektron porusza się w polu magnetycznym, to działa na niego siła Lorentza. Przepływ prądu elektrycznego przez przewodnik można traktować jako ruch jednostajny elektronów wzdłuż drutu (Rys. 11.12.). Gdy przewodnik umieszczony jest w polu magnetycznym na każdy elektron działa siła skierowana prostopadle do kierunku linii pola magnetycznego oraz prostopadła do kierunku wyznaczonego przez przewodnik. Suma wszystkich sił działających na dryfujące wzdłuż przewodnika elektrony jest siłą, z jaką pole magnetyczne działa na przewodnik z prądem. Siłę, która działa na przewodnik z prądem umieszczony w polu magnetycznym nazywamy **siłą elektrodynamiczną**. Wartość siły elektrodynamicznej można obliczyć ze wzoru:



Rys. 11.12. Na przewodnik, w którym płynie prąd, po umieszczeniu go w polu magnetycznym działa siła elektrodynamiczna

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

gdzie:  $B$  – wartość indukcji pola magnetycznego,

$I$  – natężenie prądu płynącego w przewodniku,

$l$  – długość przewodnika znajdująca się w obszarze pola magnetycznego,

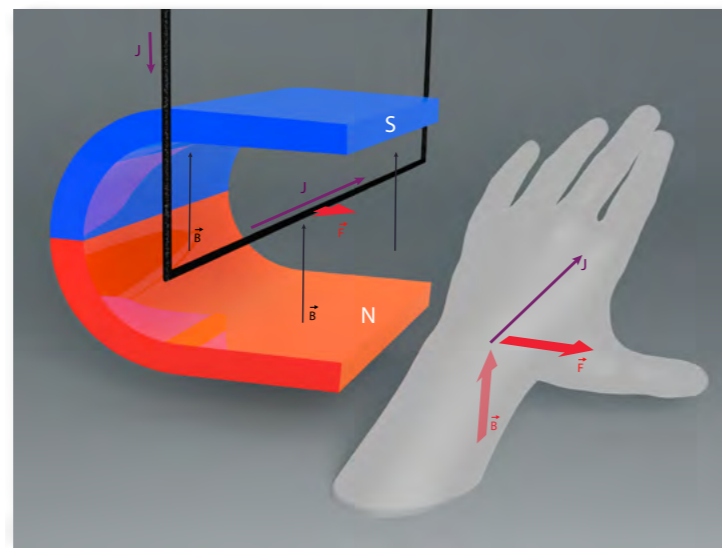
$\alpha$  – kąt pomiędzy liniami pola magnetycznego oraz przewodnikiem.

Sposób ustalania kierunku i zwrotu siły elektrodynamicznej można zobaczyć w filmiku znajdującym się w pliku:

**Patrz: Doświadczenie 1**

Jak można było zauważyć oglądając filmik kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej można ustalić korzystając z reguły lewej dłoni (Rys. 11.13.). Ustawiamy lewą dłoń w taki sposób, aby pole magnetyczne wbijało się w otwartą dłoń, a cztery wyprostowane palce wskazywały kierunek przepływu prądu w przewodniku. Wówczas odgięty kciuk wskazuje kierunek i zwrot siły z jaką pole magnetyczne oddziałuje na przewodnik z prądem.

Źródłem pola magnetycznego może być nie tylko widoczny na filmiku mag-



Rys. 11.13. Reguła lewej dłoni pozwala ustalić kierunek i zwroty siły działającej na przewodnik z prądem w polu magnetycznym

nes trwały, ale też przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny. Przeanalizujemy, w jaki sposób działają na siebie dwa przewodniki prostoliniowe umieszczone równoległe do siebie (Rys. 11.14.). W każdym z nich płynie prąd elektryczny, o natężeniach wynoszących odpowiednio  $I_1$  oraz  $I_2$ . Wokół przewodnika oznaczonego cyfrą 1 powstaje pole magnetyczne zaznaczone na rysunku kolorem niebieskim. W miejscu, którym znajduje się przewodnik oznaczony cyfrą 2 wartość indukcji magnetycznej pola wytworzonego przez przewodnik 1 wynosi  $B_1$ . Stosując regułę lewej dłoni można wyznaczyć kierunek i zwrot siły, z jaką pole magnetyczne przewodnika 1 działa na przewodnik 2. Wokół przewodnika oznaczonego cyfrą 2 powstaje pole magnetyczne zaznaczone na rysunku kolorem zielonym. W miejscu, którym znajduje się przewodnik oznaczony cyfrą 1 wartość indukcji magnetycznej pola wytworzonego przez przewodnik 2 wynosi  $B_2$ . Stosując regułę lewej dłoni można wyznaczyć kierunek i zwrot siły, z jaką pole magnetyczne przewodnika 2 działa na przewodnik 1. Jak można zauważyć przewodniki te przyciągają się wzajemnie. Wyznamy wartość sił wzajemnego przyciągania. Wartość siły, z jaką przewodnik 1 przyciąga przewodnik 2 można wyznaczyć ze wzoru:

$$F_1 = B_1 \cdot I_2 \cdot \Delta l$$

gdzie:  $B_1$  – wartość indukcji magnetycznej pola wytworzonego przez przewodnik 1,

$I_2$  – natężenie prądu płynącego przez przewodnik 2,

$\Delta l$  – długość odcinka przewodu,

Pamiętając o tym, że wartość indukcji pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik 1 można obliczyć ze wzoru:

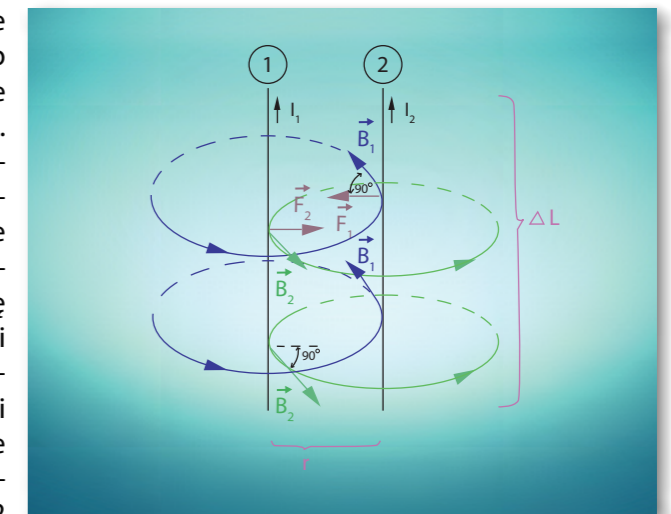
$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi \cdot r}$$

wartość, z jaką przewodnik 1 działa na przewodnik 2 wyraża się wzorem:

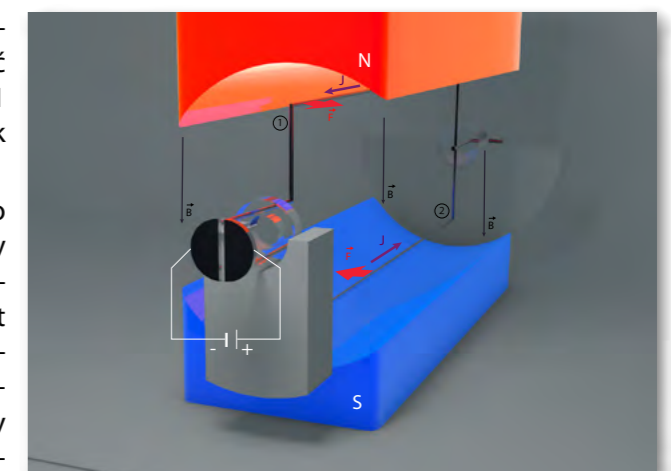
$$F_1 = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi \cdot r} \Delta l$$

Zgodnie z III zasadą dynamiki oddziaływanie między przewodnikami jest wzajemne, więc wartość siły, z jaką przewodnik 2 działa na przewodnik 1 jest taka sama jak wartość siły z jaką przewodnik 1 działa na przewodnik 2.

W praktyce fakt działania pola magnetycznego na przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny wykorzystuje się do budowy silników elektrycznych. Na rysunku 11.15 przedstawiono schemat działania takiego silnika. Ramka z drutu zamocowana jest na osi w polu magnetycznym. Zakładamy, że zamocowanie jest idealne, brak jest siły oporu ruchu. Ramka za pośrednictwem komutatora jest podłączona do źródła prądu stałego.

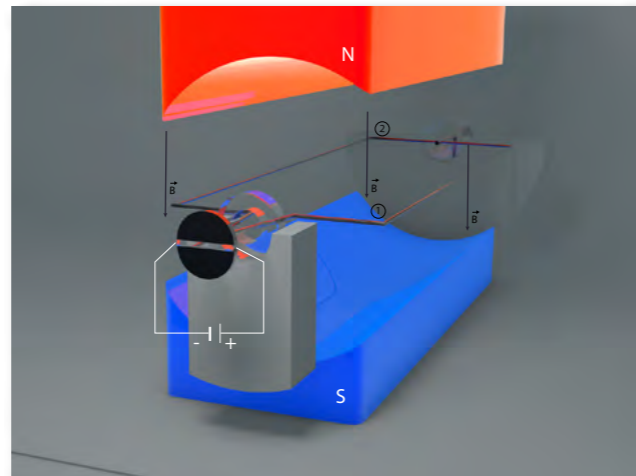


Rys. 11.14. Prostoliniowe przewodniki, w których płyną prądy w tę samą stronę, przyciągają się wzajemnie

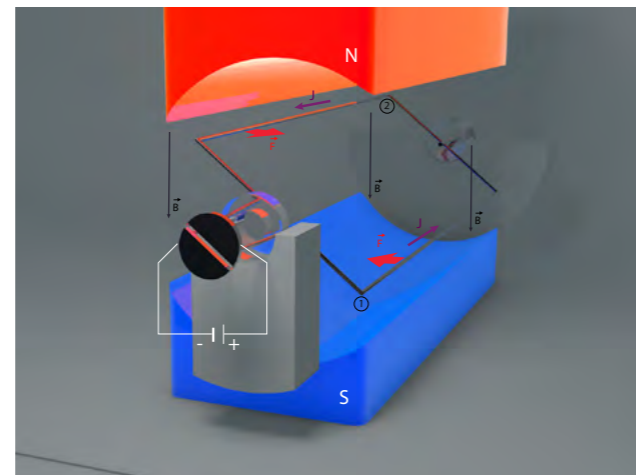


Rys. 11.15a. Schemat działania silnika elektrycznego na prąd stały

W chwili początkowej na ramkę działa para sił  $\vec{F}_1$  oraz  $\vec{F}_2$ . Kierunki i zwroty tych sił ustalone zostały przy użyciu reguły lewej dłoni. Siły te powodują obrót ramki. Gdy ramka ustawia się prostopadle do kierunku wyznaczonego przez pole magnetyczne, to komutator powoduje, że przez ramkę nie przepływa prąd elektryczny (Rys. 11.15 b)). Ramka poruszając się z pewną prędkością kątową nie zatrzymuje się, lecz przechodzi przez ten punkt. Po przejściu ramki przez położenie pionowe przez ramkę zaczyna przepływać prąd elektryczny. Ale zauważamy, że jego kierunek w każdej ramce jest teraz przeciwny do początkowego (Rys. 11.15 c)). Jest to możliwe dzięki zastosowaniu komutatora. Kierunki i zwroty sił działających na ramkę powodują jej dalszy obrót. W rzeczywistych silnikach elektrycznych każda ramka składa się z wielu zwojów, a ramek jest taka ilość, żeby w każdym położeniu wirnika względem stojana siły powodujące obrót wirnika były podobne.



Rys. 11.15b. Schemat działania silnika elektrycznego na prąd stały



Rys. 11.15c. Schemat działania silnika elektrycznego na prąd stały

**Podsumowanie**

Na przewodnik z prądem w polu magnetycznym działa siłą elektrodynamiczną o wartości, którą można obliczyć ze wzoru:

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

Działanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem jest podstawą działania silników elektrycznych.

**W Internecie**

Na stronie internetowej Hands-On Universe można znaleźć (w zakładce ćwiczenia) sposób wykonania prostego modelu silnika elektrycznego na prąd stały.

**Temat 4**

**Zjawisko indukcji elektromagnetycznej**

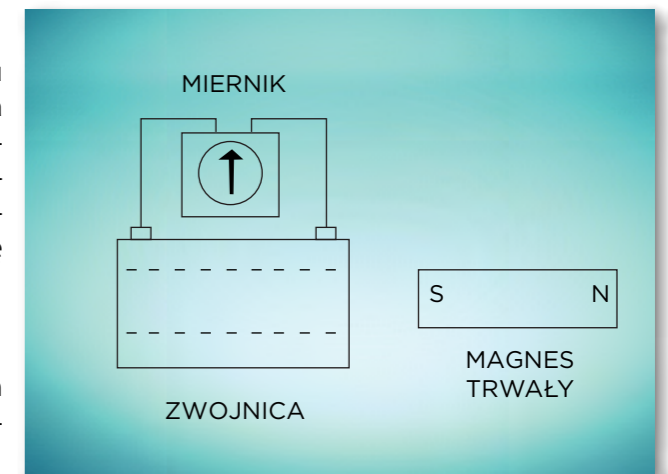
**Wstęp**

W roku 1820 duński uczyony Hans Ch. Ørsted odkrył, że wokół przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny powstaje pole magnetyczne. Jakiś czas później pewien naukowiec z Anglii próbował stwierdzić istnienie sytuacji odwrotnej. Próbował uzyskać prąd elektryczny w obecności pola magnetycznego. W roku 1831 udało mu się doprowadzić do uzyskania prądu elektrycznego w obwodzie umieszczonym w zmieniającym się polu magnetycznym. Naukowiec ten nazywał się Michael Faraday. Temat niniejszy jest poświęcony odkryciu powstawania prądów indukcyjnych.

Prześledźmy proste doświadczenia będące powtórzeniem eksperymentów przeprowadzonych przez M. Faradaya.

**Doświadczenie 1**

Na rysunku 11.16. przedstawiono schemat układu doświadczalnego. Zwojnica jest podłączona do czułego miernika, który mierzy wartość natężenia prądu oraz wskazuje kierunek jego przepływu. W pobliżu zwojownicy znajduje się nieruchomy magnes trwały. Magnes ten może się przemieszczać względem zwojownicy.



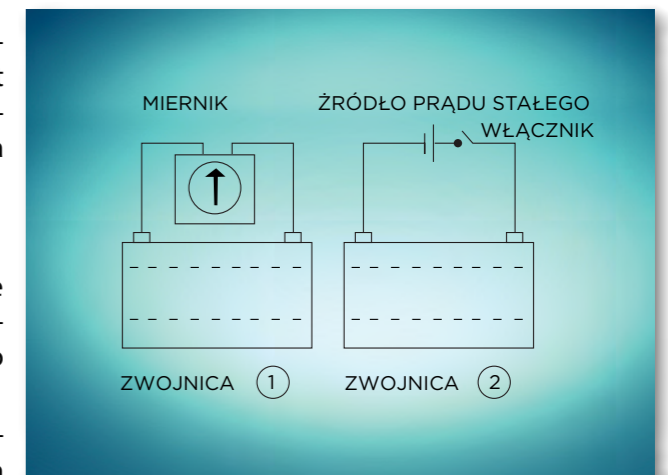
Rys. 11.16. Schemat układu doświadczalnego do badania zjawiska indukcji elektromagnetycznej

**Wyniki doświadczenia**

1. Gdy magnes jest nieruchomy względem zwojownicy, to miernik nie wskazuje przepływu prądu elektrycznego.
2. Gdy magnes porusza się względem zwojownicy, to miernik wskazuje przepływ prądu.
3. Im ruch magnesu względem zwojownicy jest szybszy, tym wartość natężenia prądu wskazywanego przez miernik jest większa.
4. Gdy zmienia się zwrot ruchu magnesu, to zmienia się kierunek płynięcia prądu elektrycznego w zwojownicy.

**Doświadczenie 2.**

Wprowadzamy pewną zmianę w układzie pomiarowym z poprzedniego doświadczenia. Zamiast magnesu trwałego wprowadzamy drugą zwojnicę. Druga zwojnica jest podłączona do źródła prądu stałego (Rys. 11.17).



Rys. 11.17. Schemat układu doświadczalnego do badania powstawania prądów indukcyjnych

**Wyniki doświadczenia.**

1. Podobnie jak poprzednio nieruchome względem siebie zwojnice nie powodują powstawania prądu elektrycznego w zwojownicy 1.
2. Gdy zmieniamy natężenie prądu (na przykład przez włączanie i wyłączanie zasilania zwojownicy 2), to w zwojownicy 1 stwierdzamy płynięcie prądu elektrycznego.

3. Gdy natężenie prądu zasilającego zwojnicę 2 rośnie prąd powstający w zwojnicy 1 płynie w jednym kierunku, a gdy natężenie prądu zasilającego zwojnicę 2 maleje, to kierunek prądu powstającego w zwojnicy 1 zmienia się.

Z obu doświadczeń płyną następujące wnioski. Stałe pole magnetyczne nie powoduje powstawania prądu elektrycznego. Prąd elektryczny powstaje w obwodzie, który znajduje się w obszarze zmieniającego się pola magnetycznego. Taki prąd elektryczny nazywamy prądem indukcyjnym. Opisując prawa przepływu prądu elektrycznego zdefiniowaliśmy pojęcie siły elektromotorycznej źródła. W przypadku prądów indukcyjnych też można takie pojęcie wprowadzić. Siła elektromotoryczna indukcji elektromagnetycznej jest to praca przypadająca na jednostkę ładunku elektrycznego, której wykonanie powoduje ruch tego ładunku w przewodniku umieszczonym w zmieniającym się polu magnetycznym.

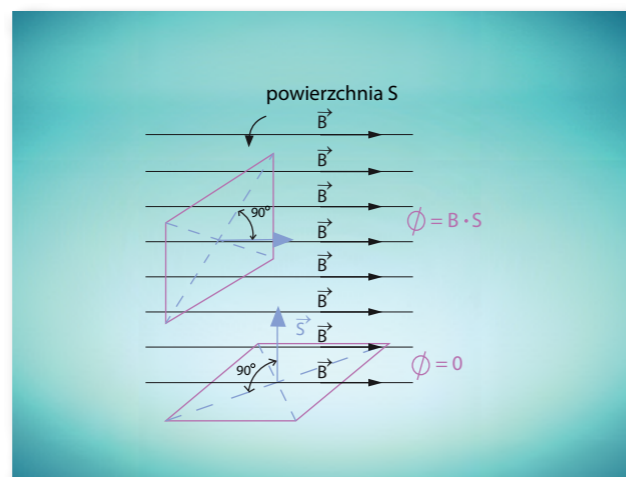
**Prawo indukcji M. Faradaya:**

**Wartość siły elektromotorycznej indukcji w obwodzie znajdującym się w polu magnetycznym jest wprost proporcjonalna do szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej pola obejmującego ten obwód.**

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Jednostką siły elektromotorycznej indukcji jest [V] (wolt).

Żeby zrozumieć zapis prawa indukcji musimy wyjaśnić pojęcie strumienia indukcji magnetycznej. Strumień indukcji magnetycznej można sobie wyobrazić jako linie pola magnetycznego przepływającego przez pewną powierzchnię (Rys. 11.18.).



Rys. 11.18 Strumień indukcji magnetycznej przechodzący przez powierzchnię S

Powierzchnię reprezentuje wektor  $\vec{S}$ . Wektor ten jest prostopadły do powierzchni, a jego długość jest proporcjonalna do wielkości powierzchni. Gdy powierzchnia S jest ustawiona prostopadle do pola magnetycznego, to strumień indukcji przechodzący przez tę powierzchnię wynosi  $\Phi = B \cdot S$ . Gdy powierzchnia S jest ustawiona równoległa do linii pola magnetycznego, to strumień indukcji jest równy zero. Wyrażenie, z którego można obliczyć wartość strumienia indukcji magnetycznej:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

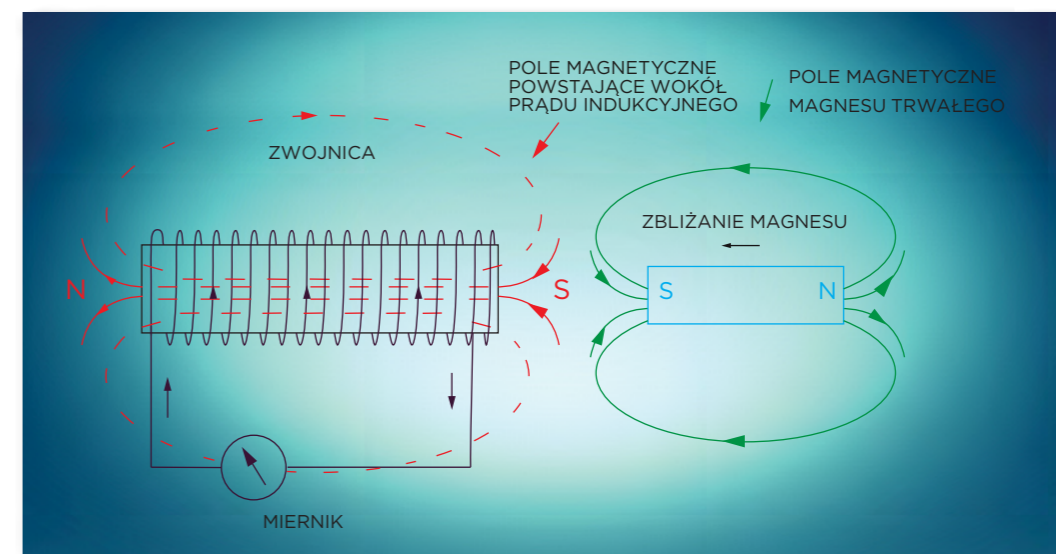
gdzie: B – wartość indukcji magnetycznej pola magnetycznego,

S – pole powierzchni, przez które przechodzi pole magnetyczne,

$\alpha$  – kąt między wektorem indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  a wektorem powierzchni  $\vec{S}$

Jednostką strumienia indukcji magnetycznej jest [Wb] (weber).  $1Wb = T \cdot m^2 = \frac{kg \cdot m^2}{C \cdot s}$

W prawie indukcji Faradaya występuje znak „-”. Znak ten można interpretować jako informację, że siła elektromotoryczna spowoduje przeciwdziałanie zmianom strumienia indukcji magnetycznej, która była przyczyną jej powstania. Tę regułę przekory, dzięki której będzie można wyznaczyć kierunki prądów indukcyjnych nazywamy regułą Lenza.



Rys. 11.19. Ustalenie kierunku przepływu prądu indukcyjnego

**Reguła Lenza**

Kierunek prądu indukcyjnego jest taki, że pole magnetyczne powstające wokół tego prądu przeciwdziała przyczynie, która go wywołała.

Użyjmy tej reguły do ustalenia kierunku prądu indukcyjnego w następującym przypadku. Zwojnica jest połączona z miernikiem, który wskaże wartość oraz kierunek przepływu prądu indukcyjnego (Rys. 11.19.). Do zwojnicy zbliża się biegunem S magnes trwały. W zwojnicy powstanie prąd indukcyjny, którego przyczyną powstania jest zbliżający się magnes. Wokół prądu indukcyjnego płynącego w zwojnicy powstaje pole magnetyczne. Pole to ma biegun S ze strony zbliżającego się magnesu trwałego. W ten sposób pole magnetyczne powstające wokół prądu indukcyjnego odpycha zbliżający się magnes trwały. Aby lepiej utrwalić poznana regułę polecamy prześledzić symulację dostępną w pliku:

**Patrz symulacja: Zjawisko indukcji elektromagnetycznej.**

**Podsumowanie**

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na wytwarzaniu prądu elektrycznego w obwodzie pod wpływem zmian pola magnetycznego obejmującego ten obwód.

**Prawo indukcji M. Faradaya:**

Wartość siły elektromotorycznej indukcji w obwodzie znajdującym się w polu magnetycznym jest wprost proporcjonalna do szybkości zmian strumienia indukcji magnetycznej pola obejmującego ten obwód.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

**Reguła Lenza**

Kierunek prądu indukcyjnego jest taki, że pole magnetyczne powstające wokół tego prądu przeciwdziała przyczynie, która go wywołała.



Temat 5

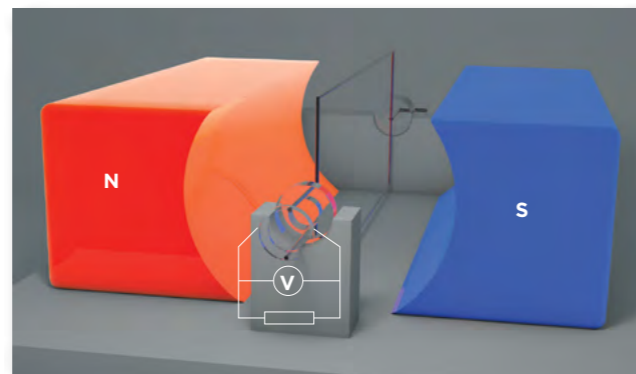
Prądnica prądu przemiennego

Wstęp

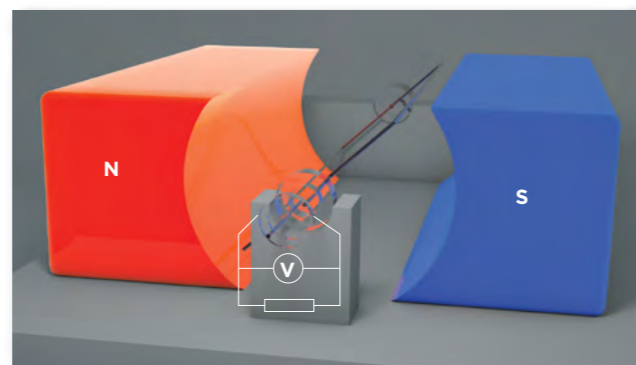
Pewien minister zajmujący się sprawami finansowymi w rządzie brytyjskim zapytał odkrywcę zjawiska indukcji elektromagnetycznej, Michaela Faradaya, o to, co ludzkość będzie miała z jego odkrycia. M. Faraday odparł, że nie wie, ale na pewno będzie trzeba za to płacić podatki. W roku 2014 stawka podatku VAT na energię elektryczną w Polsce dla odbiorców indywidualnych wynosi 22%. W temacie tym będziemy się zajmować wyjaśnieniem tego jak elektrownie „robią” prąd.

Podstawą działania prądnic jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Prąd elektryczny można uznać za formę przekazu energii. Więc aby powstała ta forma energii należy do jej powstania zużyć inną formę energii. Już analiza kierunków płynięcia prądów indukcyjnych z reguły Lenza powinna nas przekonać o tym, że zbliżanie magnesu do zwojnicy wymaga wykonania pracy. Bowiem pola magnetyczne magnesu trwałego oraz pole magnetyczne powstające wokół prądu indukcyjnego odpychają się wzajemnie.

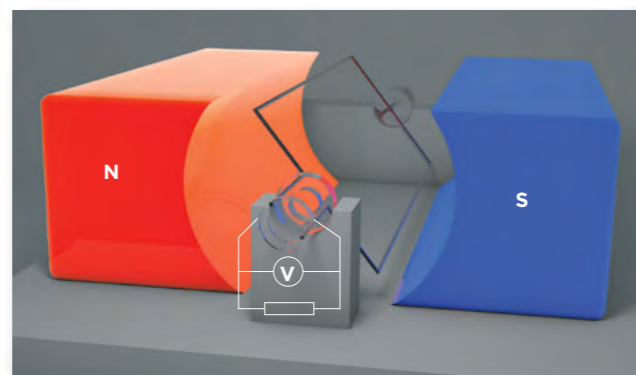
Na rysunku 11.20 przedstawiono prosty model prądnicy prądu przemiennego. Obudowę (stojan) tworzy magnes trwały. W polu magnetycznym tego magnesu znajduje się ramka z drutu. Ramka ta jest zamocowana w taki sposób, że za pomocą korby można ją wprawiać w ruch wirowy. Niech w chwili początkowej ramka będzie ustawiona prostopadle do linii pola magnetycznego. Strumień indukcji magnetycznej przechodzący przez ramkę wynosi wówczas  $\Phi = B \cdot S$ . Gdy w wyniku działania zewnętrznej siły ramka zacznie się obracać, to zmieni się strumień indukcji magnetycznej obejmowany przez ramkę. W wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej w ramce zacznie płynąć prąd indukcyjny (Rys. 11.20 b)). Po przejściu przez położenie, w którym ramka jest równoległa do linii pola magnetycznego zmienia się kierunek płynięcia prądu indukcyjnego (Rys. 11.20. c)). Powstawanie prądu indukcyjnego można prześledzić analizując symulację pracy prądnicy w poniższym pliku:



Rys. 11.20a. Schemat działania prądnicy prądu przemiennego.



Rys. 11.20b. Schemat działania prądnicy prądu przemiennego.



Rys. 11.20c. Schemat działania prądnicy prądu przemiennego.

Patrz symulacja: Prądnica prądu przemiennego.

Zmiany strumienia indukcji magnetycznej zachodzące w prądnicach są w jednostce czasu dość duże, więc prawo indukcji Faradaya dla prądnicy można zapisać w postaci pochodnej strumienia po czasie:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Ramka prądnicy obraca się ze stałą prędkością kątową  $\omega$ , więc kąt  $\alpha$  między kierunkiem pola magnetycznego oraz kierunkiem wektora powierzchni zmienia się zgodnie ze wzorem:  $\alpha = \omega \cdot t$ .

Strumień indukcji magnetycznej obejmowany przez ramkę prądnicy zmienia się w czasie w sposób opisany równaniem:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Wstawiając to wyrażenie do wzoru na wartość siły elektromotorycznej otrzymamy:

$$\mathcal{E} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos(\omega \cdot t))}{dt}$$

Rozwiązując powyższą pochodną otrzymamy:

$$\mathcal{E} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

W prądnicach ramka składa się z wielu zwojów, więc całkowitą siłą elektromotoryczną powstającą w ramce można obliczyć ze wzoru:

$$\mathcal{E} = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

gdzie:  $N$  – ilość zwojów ramki prądnicy,

$B$  – wartość indukcji magnetycznej pola wytworzonego przez stojan,

$S$  – pole powierzchni ramki,

$\omega$  – wartość prędkości kątowej ramki.

Wartość prędkości kątowej ramki można wyznaczyć z wyrażenia:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , gdzie  $f$  – częstotliwość obrotu ramki. Maksymalną wartość (amplitudę) siły elektromotorycznej powstającej w ramce można zapisać wzorem:

$$\mathcal{E}_0 = N \cdot B \cdot S \cdot \omega$$

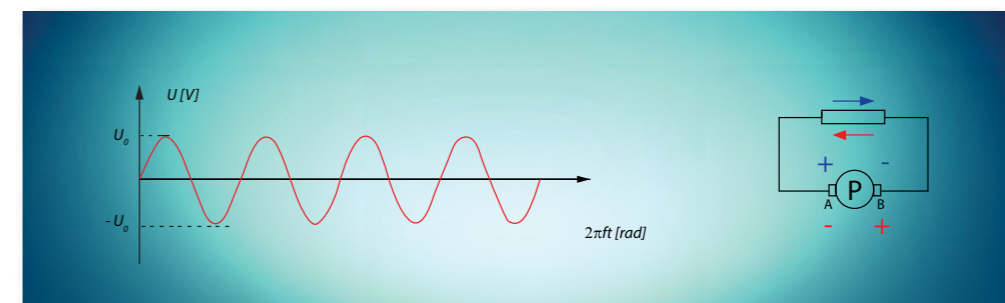
Wówczas wartość siły elektromotorycznej powstającej w prądnicach, której ramka obraca się z częstotliwością  $f$  można zapisać w następujący sposób:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Gdy można zaniedbać opór wewnętrzny prądnicy jej siła elektromotoryczna będzie równa napięciu na jej zaciskach:

$$U = U_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Na rysunku 11.21 przedstawiono wykres zmian napięcia na zaciskach prądnicy prądu przemiennego. Jak łatwo zauważyć zmienia się nie tylko wartość napięcia, ale również jego znak. Można sobie wyobrazić, że wartość dodatnia napięcia jest wtedy, gdy na zacisku A prądnicy jest „plus”, a na zacisku B „minus”. Wówczas przez odbiornik podłączony do prądnicy popłynie prąd oznaczony na rysunku kolorem niebieskim. Gdy znaki na zaciskach prądnicy zmienią się, to przez odbiornik popłynie prąd w przeciwnym kierunku.



Rys. 11.21. Wykres zmian napięcia na zaciskach prądnicy prądu przemiennego.

Źródłem energii elektrycznej w polskich sieciach energetycznych są prądnice prądu przemiennego zainstalowane w elektrowniach. Prądnice wszystkich elektrowni podłączonych do sieci muszą być ze sobą zsynchronizowane. To znaczy muszą mieć tę samą częstotliwość zmian napięcia (wynosi ona 50 Hz) oraz w tych samych momentach czasu wartości napięcia muszą osiągać swoje maksymalne wartości. Energia elektryczna wytworzona w danym momencie musi być w tym samym czasie odebrana przez odbior-

ców. To jest przyczyną powodującą, że elektrownie sprzedają energię elektryczną w niższych cenach w okresach zmniejszonego zapotrzebowania na nią. I jest również odpowiedzią na pytanie, dlaczego elektrownie wiatrowe w Polsce nie mogą zapewnić bezpieczeństwa energetycznego (bo co będzie źródłem energii w momentach, w których wiatr nie wieje).

**Podsumowanie**

Podstawą działania prądnic jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej.

Siła elektromotoryczna prądnicy prądu przemiennego:

$$\mathcal{E} = N \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Częstotliwość zmian napięcia w polskich sieciach energetycznych wynosi 50 Hz.

**Temat 6**

**Prąd przemienny. Transformator**

**Wstęp**

**Zapewne wielu z was zastanawiało się, dlaczego między elektrownią a odbiorcą energii elektrycznej jest linia wysokiego napięcia. Czy nie można by przysyłać energii elektrycznej pod napięciem 230 V używanym w domach? W temacie tym wyjaśnimy też rolę transformatorów w procesie zmian napięcia i natężenia prądu przemiennego.**

Napięcie na zaciskach prądnicy prądu przemiennego można obliczyć ze wzoru:

$$U = U_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Gdy do prądnicy podłączymy odbiornik o oporze  $R$  (Rys. 11.22), to popłynie przez niego prąd o natężeniu:

$$I = \frac{U}{R}$$

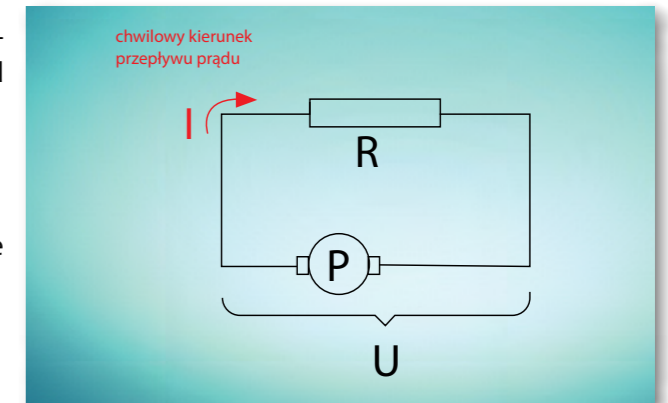
Wstawiając do powyższego wzoru wyrażenie na napięcie na zaciskach prądnicy otrzymamy:

$$I = \frac{U_0}{R} \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

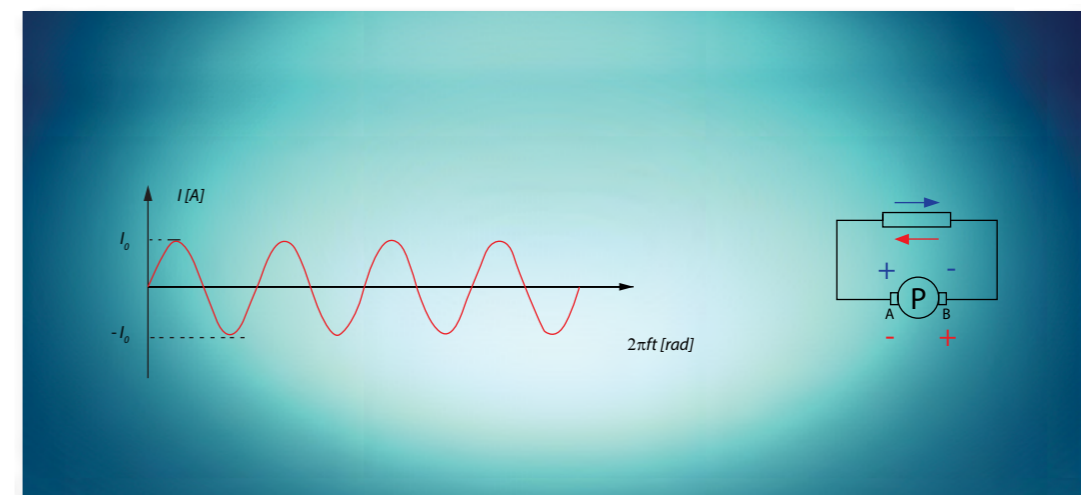
Wyrażenie  $\frac{U_0}{R} = I_0$  jest amplitudą natężenia prądu, więc natężenie prądu płynącego przez odbiornik można wyrazić wzorem:

$$I = I_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Wykres natężenia prądu przemiennego przedstawia rysunek 11.23. Prąd przemienny zmienia nie tylko wartość, ale również kierunek przepływu.



Rys. 11.22. Gdy do prądnicy podłączymy odbiornik, w obwodzie popłynie prąd elektryczny o natężeniu  $I$



Rys. 11.23. Wykres zmian natężenia prądu płynącego w obwodzie podłączonym do prądnicy prądu przemiennego

**Moc prądu przemiennego**

Jak pamiętacie z tematów poświęconych prądowi stałemu moc prądu elektrycznego można obliczyć ze wzoru  $P = U \cdot I$ . Wstawiając do tego wzoru wyrażenia na napięcie oraz natężenie prądu przemiennego otrzymamy:

$$P = U_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot I_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t),$$

lub:

$$P = U_0 \cdot I_0 \sin^2(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Pamiętając o tym, że  $U_0 = I_0 \cdot R$  otrzymamy:

$$P = R \cdot I_0^2 \sin^2(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Sporządźmy wykres mocy wydzielonej na odbiorniku w zależności od czasu (Rys. 11.24.).

Jak można zauważyć z wykresu moc wydzielona na odbiorniku podczas przepływu prądu przemiennego zmienia się. Pamiętajmy jednak, że zmiany natężenia prądu płynącego przez odbiornik są stosunkowo szybkie. Częstotliwość tych zmian w polskich sieciach energetycznych wynosi 50 Hz, czyli ich okres jest równy 0,02 s. Odbiorniki energii elektrycznej są z reguły podłączone do sieci znacznie dłużej niż wynosi okres zmian natężenia prądu przemiennego. Wyznamy więc średnią moc wydzieloną na odbiorniku. Najłatwiej będzie to uczynić korzystając z wykresu (Rys. 11.25.). Podzielmy wykres mocy na połowę poziomą linią. Można wówczas zauważyć, że górne połówki wykresu idealnie pasują do dolnych. Użyjemy w ten sposób wykresu pewnego prądu stałego o natężeniu  $I_{ST}$ . Jak można odczytać z wykresu moc wydzielona na odbiorniku o oporze  $R$  przez ten prąd stały jest równa liczbowo średniej mocy wydzielonej przez prąd przemienny o amplitudzie natężenia  $I_0$ :

$$P_{SR} = \frac{1}{2} \cdot R \cdot I_0^2 = R \cdot I_{ST}^2$$

Z powyższego równania otrzymamy:

$$I_{ST} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = I_{SK}$$

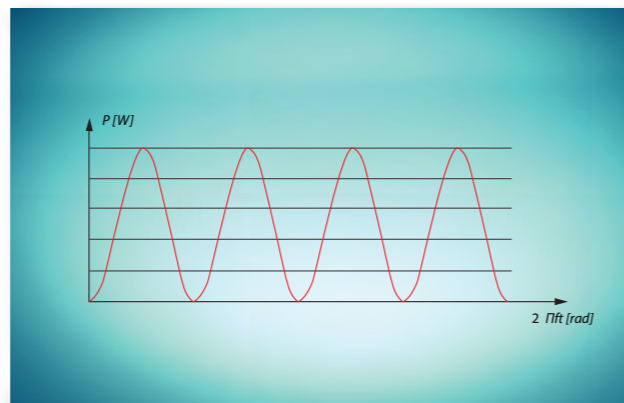
**Definicja**

Natężenie skuteczne prądu przemiennego  $I_{SK}$  o amplitudzie  $I_0$  odpowiada takiej wartości prądu stałego, że moc wydzielona podczas płynięcia obu prądów w jednakowych warunkach jest taka sama.

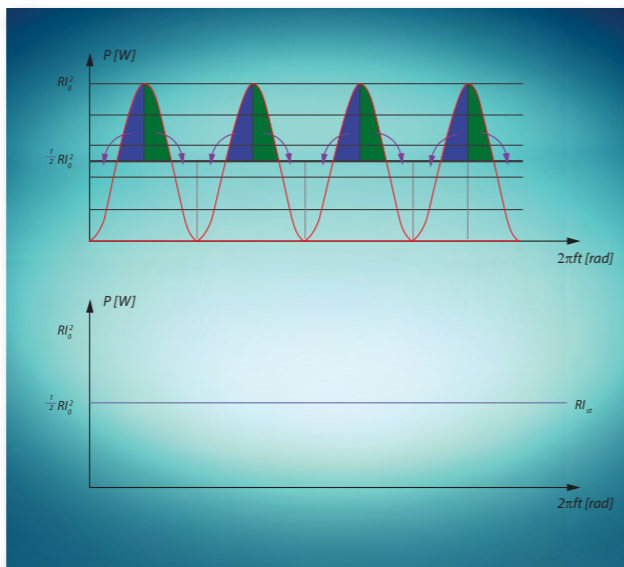
W podobny sposób można zdefiniować napięcie skuteczne prądu przemiennego:

$$U_{ST} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

W naszych domach napięcie skuteczne wynosi 230 V.



Rys. 11.24. Wykres zmian mocy wydzielonej na odbiorniku podłączonym do prądu przemiennego



Rys. 11.25. Sposób wyznaczania średniej mocy wydzielonej na odbiorniku podłączonym do źródła prądu przemiennego

**Transformator**

Transformator to urządzenie, dzięki któremu można podwyższać i obniżać napięcie prądu przemiennego. Na rysunku 11.26. przedstawiono schemat budowy transformatora. Uzwojenie pierwotne oraz wtórne są odizolowane elektrycznie od rdzenia. Rdzeń wykonany jest z ferromagnetyka miękkiego, czyli takiego który można łatwo magnesować i rozmagnesować. Rdzeń składa się w wielu cienkich blaszek odizolowanych elektrycznie od siebie. Ma to zapobiegać powstawaniu prądów indukcyjnych wewnątrz rdzenia. Zakładamy, że w omawianym modelu transformatora obwody pierwotny i wtórny mają zanedbywalnie małe opory elektryczne oraz nie występują straty energii w związku z powstawaniem prądów indukcyjnych w rdzeniu. Gdy do uzwojenia pierwotnego podłączymy źródło prądu przemiennego, to wokół tego uzwojenia oraz w rdzeniu powstanie zmieniające się w czasie pole magnetyczne. Na rysunku zaznaczono chwilowy zwrot wektora indukcji magnetycznej tego pola. Zmienne pole magnetyczne jest obejmowane przez uzwojenie wtórne. W wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej w uzwojeniu tym powstaje siła elektromotoryczna indukcji. Pamiętając o tym, że opory elektryczne obu uzwojeń są do pominięcia można zapisać wzór na przekładnię transformatora:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Napięcie  $U_2$  na uzwojeniu wtórnym jest tyle razy większe od napięcia  $U_1$  na uzwojeniu pierwotnym, ile razy więcej uzwojeń  $N_2$  ma uzwojenie wtórne niż uzwojeń  $N_1$  uzwojenie pierwotne.

Gdy  $N_2 > N_1$ , to  $U_2 > U_1$ , czyli transformator podwyższa napięcie. Gdy  $N_2 < N_1$ , to  $U_2 < U_1$ , czyli transformator obniża napięcie. Zakładając, że mamy do czynienia z idealnym transformatorem (czyli transformatorem, który nie ma strat energii) możemy zapisać, że moc dostarczona do uzwojenia wtórnego jest równa mocy wydzielonej na uzwojeniu wtórnym:

$$P_1 = P_2$$

Więc:  $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$

Z powyższego wzoru wynika, że transformator, który podnosi napięcie jednocześnie obniża natężenie. Z praw przepływu prądu elektrycznego wynika, że ciepło wydzielone na oporniku jest proporcjonalne do kwadratu natężenia przepływającego przez ten opornik prądu elektrycznego. Przesyłając energię elektryczną na duże odległości zależy nam na ograniczaniu strat energii. Dlatego buduje się linie przesyłowe pracujące pod wysokim napięciem. W poniższym pliku znajduje się opis doświadczenia, w którym wyznacza się przekładnię szkolnego modelu transformatora.

**Patrz: Doświadczenie 1. Badanie przekładni transformatora.**

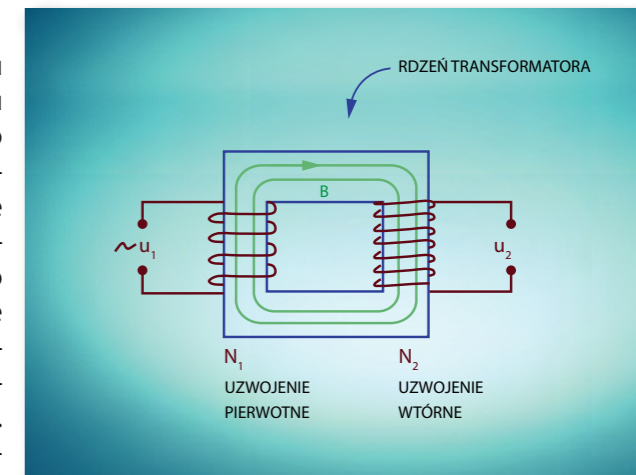
**Podsumowanie**

Natężenie skuteczne prądu przemiennego  $I_{SK}$  o amplitudzie  $I_0$  odpowiada takiej wartości prądu stałego, że moc wydzielona podczas płynięcia obu prądów w jednakowych warunkach jest taka sama:

$$I_{SK} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Przekładnia transformatora:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$



Rys. 11.26. Schemat budowy transformatora

## Temat 7

### Dioda jako prostownik

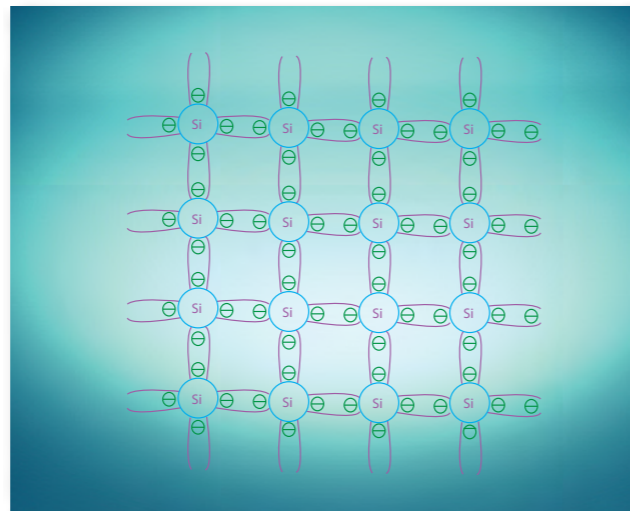
#### Wstęp

Telefony komórkowe i laptopy są przykładami urządzeń, które posiadają zasilanie w postaci akumulatora. Akumulatory tych urządzeń są ładowane za pośrednictwem ładowarek podłączonych do sieci prądu przemiennego. W temacie tym wyjaśnimy jak to się dzieje, że urządzenie pracujące na prąd stały może być podłączone do prądu przemiennego.

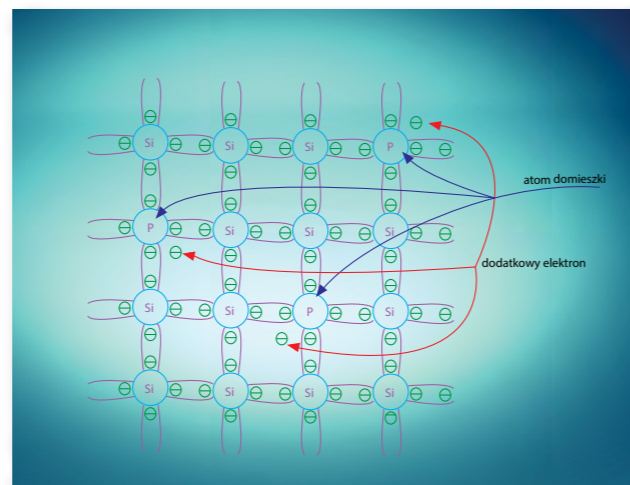
Obecnie najczęściej do układów prostowniczych używa się diod półprzewodnikowych. Nim przejdziemy do prostowniczego działania diody omówimy schemat budowy wewnętrznej półprzewodników. Przykładem półprzewodnika jest krzem. Jego sieć krystaliczna zbudowana jest w taki sposób, że każdy z czterech elektronów walencyjnych jednego atomu krzemu bierze udział w wiązaniu kowalencyjnym z jednym z elektronów walencyjnych sąsiedniego atomu (Rys. 11.27). W niskich temperaturach w sieci krystalicznej krzemu nie ma swobodnych elektronów, więc krzem nie przewodzi prądu elektrycznego. Gdy temperatura krzemu rośnie, to niektóre elektrony otrzymują energię umożliwiającą wyrwanie się z wiązania. Po takim elektronie powstaje dziura, do której może przeskoczyć inny elektron. W takim półprzewodniku nośnikami prądu mogą być zarówno elektrony, jak i miejsca po elektronach – dziury. Im temperatura półprzewodnika jest wyższa, tym więcej elektronów może zostać oderwanych od swoich atomów. Czyli im wyższa temperatura półprzewodnika, tym w jego sieci krystalicznej jest więcej nośników prądu, czyli jego opór elektryczny maleje. Opisany powyżej półprzewodnik nazywamy samoistnym.

Gdy do struktury krystalicznej półprzewodnika wprowadzi się atomy różniące się wartością, to otrzymamy półprzewodnik domieszkowany. Na przykład czterowartościowy krzem można domieszkować pięciowartościowym fosforem. Cztery elektrony walencyjne atomu fosforu będą brały udział w wiązaniach walencyjnych, a piąty będzie mógł się przemieszczać w sieci krystalicznej półprzewodnika stanowiąc nośnik ładunku (Rys. 11.28.). Półprzewodnik taki nazywamy półprzewodnikiem typu n.

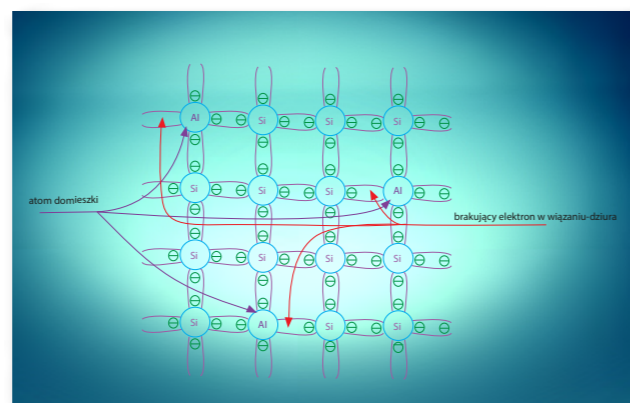
Gdy do struktury krystalicznej krzemu wprowadzimy atomy trójwartościowego aluminium, to otrzymamy półprzewodnik typu p (Rys. 11.29.). W takim półprzewodniku będzie brakować jednego elek-



Rys. 11.27. Półprzewodnik samoistny



Rys. 11.28. Półprzewodnik typu n



Rys. 11.29. Półprzewodnik typu p

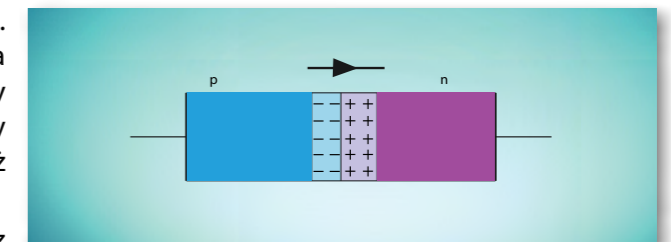
tronu do uzupełnienia wiązania kowalencyjnego. Ten brakujący elektron nazywamy dziurą. Dziura może się przemieszczać w sieci krystalicznej gdy sąsiedni elektron przeskoczy na jej miejsce. Dziury przemieszczają się w odwrotnym kierunku niż elektrony.

Połączone ze sobą półprzewodniki typu n oraz typu p stanowią diodę półprzewodnikową. Po zetknięciu się warstw półprzewodników następuje naturalny proces dyfuzji elektronów z obszaru n do obszaru p, oraz dziur z obszaru p do obszaru n. W wyniku tego procesu w warstwie n pozostają dodatnie jony atomów domieszki pięciowartościowej, a warstwie p ujemnie jony domieszki trójwartościowej. Powstaje w ten sposób cienka warstwa zaporowa, przez którą nie mogą przepływać ładunki elektryczne (Rys. 11.30.).

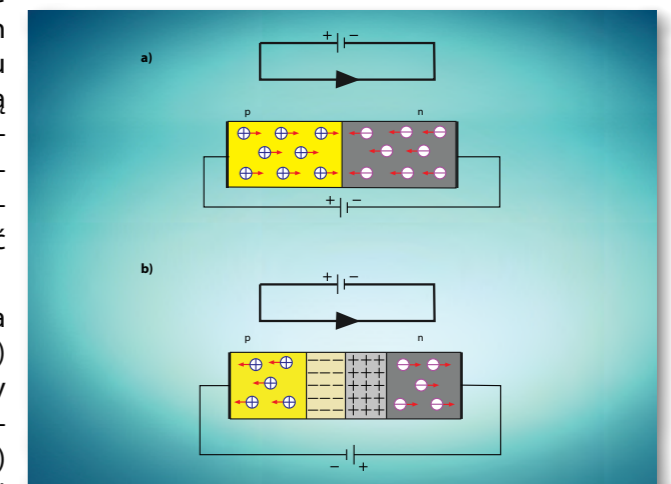
Gdy podłączymy diodę do zewnętrznego źródła napięcia w sposób pokazany na rysunku 11.31.a) to nastąpi przepływ ładunków przez diodę. Gdy podłączymy diodę do zewnętrznego źródła napięcia w sposób pokazany na rysunku 11.31.b) to nastąpi dalszy wzrost warstwy zaporowej i przez diodę nie będzie przepływał prąd elektryczny. Oznacza to, że dioda umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku. Właśność tę wykorzystuje się do budowy układów prostowniczych.

#### Układy prostownicze

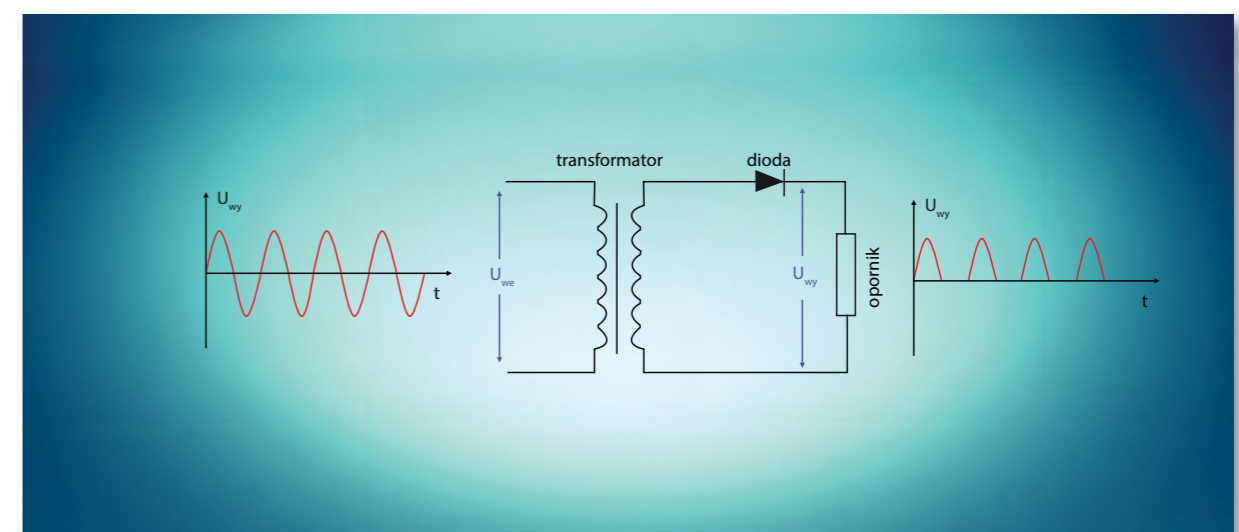
Najprostszy układ prostowniczy zawiera jedną diodę (Rys. 11.32.). Napięcie wejściowe jest sinusoidalnie zmiennie. W obwodzie wtórnym transformatora znajduje się dioda. Powoduje ona, że przez opornik prąd może przepływać tylko w jedną stronę.



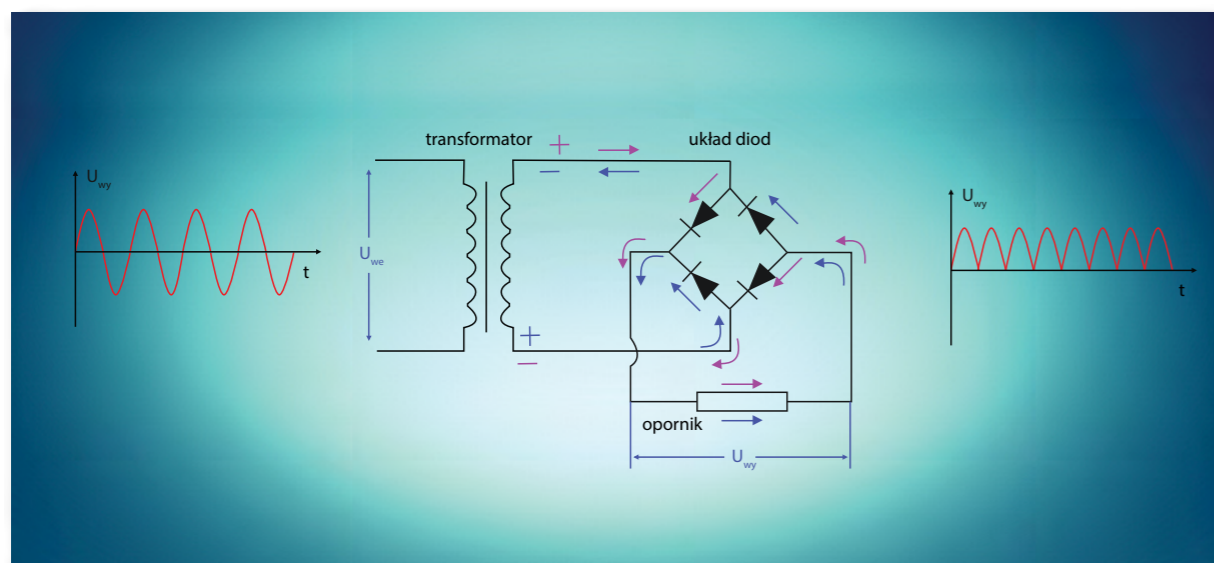
Rys. 11.30. Dioda



Rys. 11.31. Dioda spolaryzowana w kierunku: a) przewodzenia, b) zaporowym



Rys. 11.32. Układ prostowniczy z jedną diodą.



Rys. 11.33. Układ prostowniczy składający się z czterech diod.

Aby uzyskać bardziej płynne napięcie po przejściu przez prostownik stosuje się układ składający się z czterech diod (Rys. 11.33.). Załóżmy, że zmieniające się sinusoidalnie napięcie na uzwojeniu wtórnym transformatora ma w pewnym momencie znak „plus” u góry rysunku. Wówczas przez układ diod będzie płynął prąd zaznaczony kolorem fioletowym. Gdy napięcie zmieni się na przeciwne przez układ płynie prąd zaznaczony kolorem niebieskim. Jak łatwo zauważyć przez opornik prąd płynie zawsze w tym samym kierunku. Stąd napięcie na jego końcach zmienia się w sposób przedstawiony na wykresie. Dla uzyskania jeszcze bardziej wygładzonego przebiegu napięcia w układach prostowniczych stosuje się jeszcze kondensatory.

#### Podsumowanie

Dioda to element półprzewodnikowy zbudowany z połączonych ze sobą półprzewodników typu n oraz typu p. Przez diodę prąd przepływa tylko w jednym kierunku. Diody można stosować do budowy układów prostowniczych.

*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego