



## Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film samouczek](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)

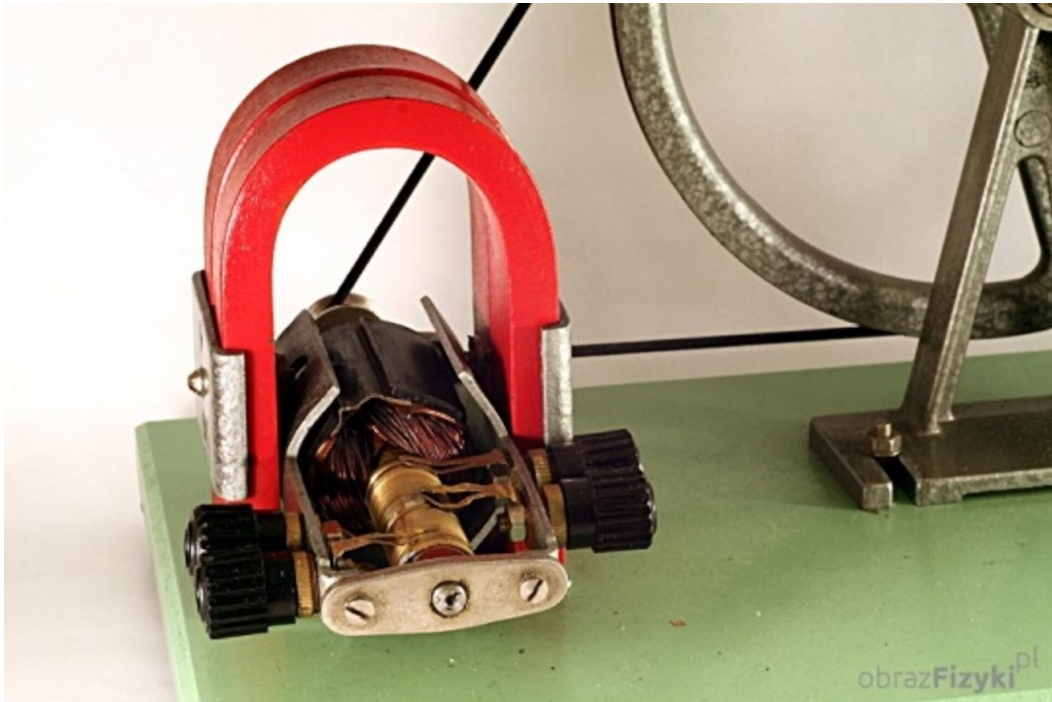


## Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya

### Czy to nie ciekawe?

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na wytwarzaniu prądu indukcyjnego (SEM indukcji) w obwodzie zamkniętym, podczas zmiany strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez ten obwód. Wykonując eksperymenty można przekonać się o tym, że natężenie prądu indukcyjnego zależy od tego, jak szybko zmieniamy strumień indukcji pola magnetycznego. Na przykład, gdy obracamy ramkę prądnicą powoli, to maksymalne napięcie uzyskujemy wtedy niższe niż wtedy, gdy robimy to szybko.

W tym e-materiale będzie mowa o prawie Faradaya – prawie, które w sposób ilościowy przedstawia od czego zależy siła elektromotoryczna indukcji. Co ciekawe, z tego prawa wynika również kierunek prądu indukcyjnego.



Rys. a. Szkolny model prądnicy

## Twoje cele

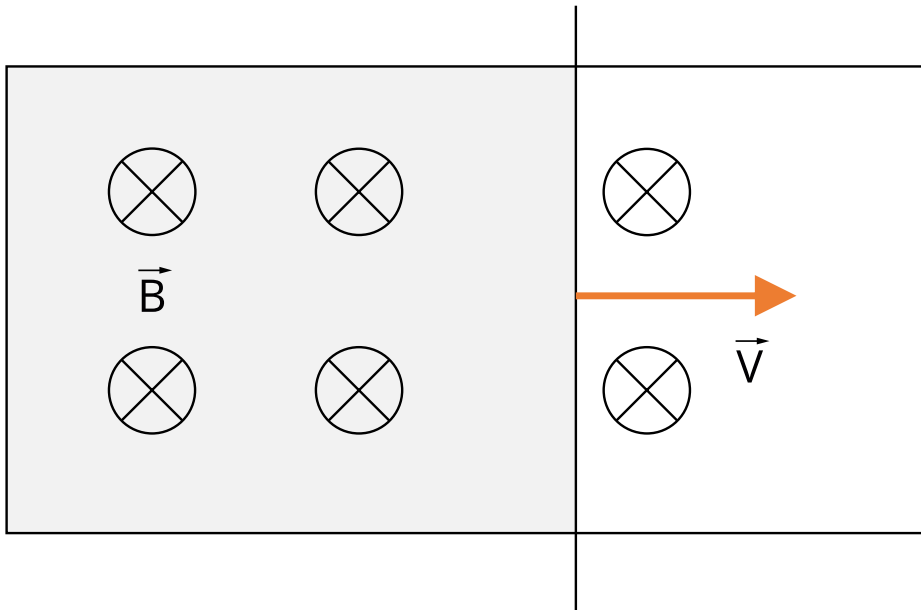
W tym e-materiale:

- poznasz fundamentalne prawo fizyczne – prawo Faradaya, opisujące ilościowo zjawisko indukcji elektromagnetycznej,
- nauczysz się stosować prawo Faradaya do obliczania wartości natężenia prądu indukcyjnego wzbudzonego w obwodzie,
- zrozumiesz związek prawa Faradaya z zasadą zachowania energii,
- zastosujesz prawo Faradaya do rozwiązywania zadań problemowych i rachunkowych.

# Przeczytaj

## Warto przeczytać

Wyobraź sobie najprostszy obwód z ruchomym bokiem (poprzeczką) umieszczony w polu magnetycznym tak, że powierzchnia obwodu jest prostopadła do linii pola magnetycznego (Rys. 1.).



Rys. 1. Obwód z ruchomym bokiem (poprzeczką), umieszczony w polu magnetycznym tak, że powierzchnia obwodu jest prostopadła do linii pola magnetycznego

Przesuwamy poprzeczkę z prędkością  $\vec{v}$  w prawą stronę. Zmienia się wtedy **strumień indukcji magnetycznej** przenikający powierzchnię rozpiętą na obwodzie, zaznaczoną na rysunku ciemniejszym kolorem.

Przypomnijmy definicję strumienia indukcji magnetycznej.

Strumieniem indukcji magnetycznej przez powierzchnię  $S$  nazywamy iloczyn skalarny wektorów  $\vec{B}$  i  $\vec{S}$ :

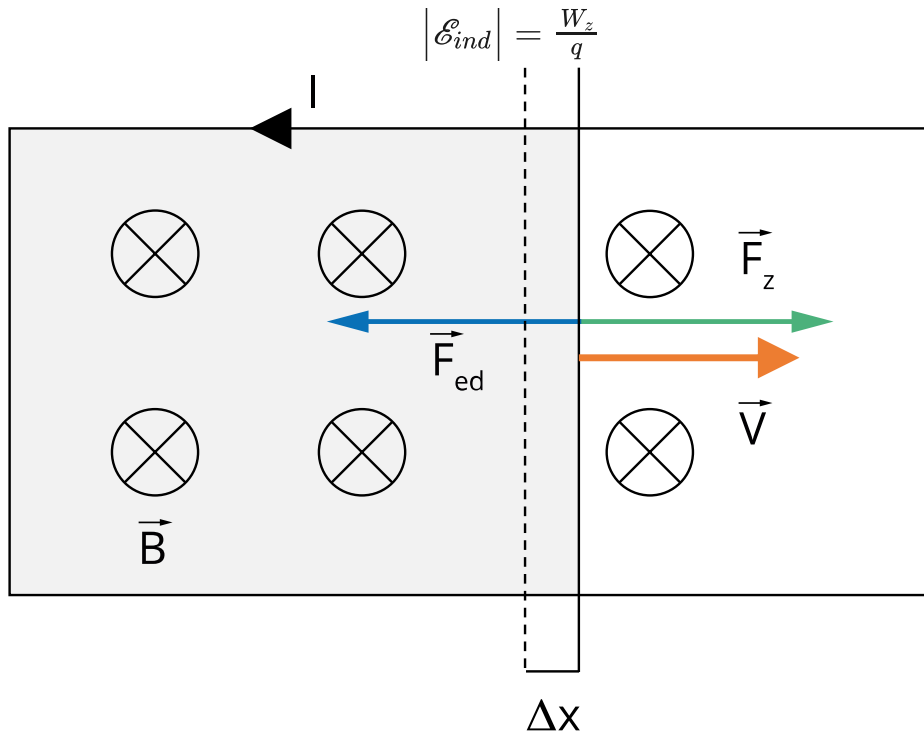
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha,$$

gdzie:  $\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{S})$ ,  $\vec{B}$  - wektor indukcji magnetycznej, a  $\vec{S}$  - wektor prostopadły do powierzchni, o długości równej jej polu.

Widać teraz, dlaczego zmienia się strumień  $\Phi_B$  (Rys. 1.) - zwiększa się wartość pola powierzchni  $S$ .

Ze względu na zmianę strumienia indukcji magnetycznej w rozważanym obwodzie powstanie siła elektromotoryczna indukcji i w związku z tym popłynie prąd.

Siła elektromotoryczna (SEM) indukcji, a właściwie jej wartość bezwzględna, zdefiniowana jest jako **praca siły zewnętrznej powodująca przemieszczenie jednostkowego ładunku wzdłuż obwodu**, co symbolicznie zapisujemy:



Rys. 2. Siła zewnętrzna  $\vec{F}_z$  równoważy siłę elektrodynamiczną  $\vec{F}_{ed}$  działającą na poprzeczkę poruszającą się ze stałą prędkością z prędkością  $\vec{v}$

W omawianym przez nas przypadku łatwo można obliczyć pracę siły zewnętrznej przy założeniu stałej prędkości ruchu poprzeczki. Siła zewnętrzna  $\vec{F}_z$  działa zgodnie z przesunięciem poprzeczki (i z wektorem prędkości) i w każdej chwili równoważy działającą w przeciwnym kierunku **siłę elektrodynamiczną**  $\vec{F}_{ed}$  (Rys. 2.). Zgodnie z definicją pracy  $W_z = F_z \cdot \Delta x$ , gdzie  $\Delta x$  jest przemieszczeniem poprzeczki w ciągu czasu  $\Delta t$ .

Wartość siły  $F_z$  równa jest wartości siły elektrodynamicznej  $F_{ed}$  działającej na poprzeczkę. Wobec tego  $W_z = IlB \cdot \Delta x$ , gdzie  $I$  oznacza natężenie prądu indukcyjnego płynącego w obwodzie (i w poprzeczce),  $l$  jest długością poprzeczki (tego fragmentu, w którym płynie prąd),  $B$  oznacza wartość indukcji magnetycznej. Wprowadźmy nasze wyrażenie na pracę do definicji SEM indukcji. Otrzymamy:

$$|\mathcal{E}_{ind}| = \frac{IlB \cdot \Delta x}{q} = \frac{IlB \cdot \Delta x}{I \cdot \Delta t} = \frac{B \cdot l \Delta x}{\Delta t} = \frac{B \cdot \Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$$

Otrzymaliśmy interesujący wynik. **Wartość bezwzględna SEM indukcji równa jest szybkości zmiany strumienia indukcji magnetycznej.**

W rozważanym tutaj przypadku strumień indukcji magnetycznej zmienia się jednostajnie w czasie. W ogólnym przypadku wcale nie musi tak być. Dlatego piszemy:

$\mathcal{E}_{ind} = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$ , gdy  $\Delta t \rightarrow 0$ , co w skrócie zapisujemy jako  $\frac{d\Phi_B}{dt}$ . Jest to pochodna strumienia po czasie.

Chociaż nasze wyprowadzenie wzoru odwołuje się do przykładu, to okazuje się, że wyprowadzona zależność ma charakter ogólny. Należy jedynie wnieść niewielką poprawkę. Jest nią znak minus, który związany jest z pewną konwencją i zasadą zachowania energii.

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya zapisujemy w następujący sposób:

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

i formułujemy:

**Siła elektromotoryczna indukcji powstająca w obwodzie zamkniętym równa jest szybkości zmiany strumienia indukcji magnetycznej przenikającej powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie, wziętej ze znakiem minus.**

To prawo słuszne jest niezależnie od sposobu zmiany strumienia pola magnetycznego; gdy zmiana strumienia wywołana jest ruchem względnym źródła pola magnetycznego i obwodu lub gdy nie ma żadnego ruchu, a zmienia się wartość indukcji magnetycznej.

Prawo Faradaya jest uniwersalnym, całościowym i kompletnym ujęciem matematycznym zjawiska indukcji elektromagnetycznej.

Wróćmy jeszcze na moment do naszego przykładu i zauważmy, że szybkość zmiany strumienia, a więc wartość bezwzględna SEM indukcji, w tym przypadku równa jest iloczynowi  $Blv$ . Wynika to z zapisanych poprzednio zależności:

$$|\mathcal{E}_{ind}| = \frac{IlB \cdot \Delta x}{q} = \frac{IlB \cdot \Delta x}{l \cdot \Delta t} = \frac{B \cdot l \Delta x}{\Delta t} = Bl \frac{\Delta x}{\Delta t} = Blv$$

## Słowniczek

### Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

(ang.: *electromagnetic induction*) wytwarzanie prądu indukcyjnego (SEM indukcji) w obwodzie zamkniętym, podczas zmiany strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez ten obwód.

### Strumień indukcji magnetycznej $\Phi_B$

(ang.: *magnetic flux*) Strumieniem indukcji magnetycznej przez powierzchnię  $S$  nazywamy iloczyn skalarny wektorów  $\vec{B}$  i  $\vec{S}$ .

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha,$$

gdzie:  $\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{S})$ ,  $\vec{B}$  - wektor indukcji magnetycznej, a  $\vec{S}$  - wektor prostopadły do powierzchni, o długości równej jej polu.

Jednostka - 1 Wb (weber),  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ .

### Reguła Lenza

(ang.: *Lenz's law*) reguła ułatwiająca szybkie wyznaczenie kierunku prądu indukcyjnego. Formułuje się ją najczęściej w następujący sposób:

**Kierunek prądu indukcyjnego jest taki, że przeciwdziała przyczynie, która go wywołała.**

Przeciwdziałanie przyczynie polega tu na tym, że gdy strumień rośnie, to pole magnetyczne wytworzone przez prąd indukcyjny jest tak skierowane, żeby zmniejszyć ten strumień. I odwrotnie: gdy strumień maleje, to wyprodukowane pole magnetyczne jest tak skierowane, żeby strumień wzmocnić.

### Ciepło Joule'a-Lenza

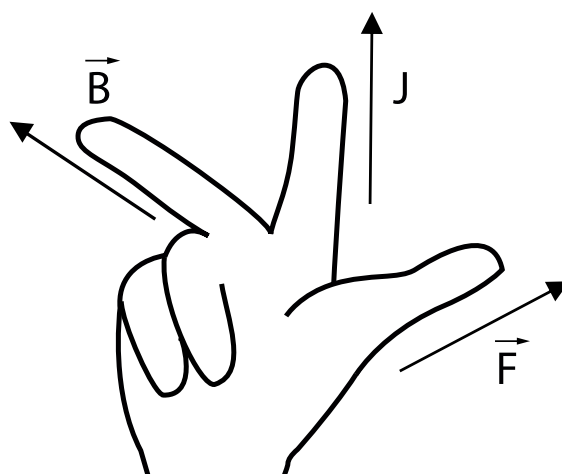
(ang.: *Joule heat*) ciepło wydzielone w obwodzie elektrycznym podczas przepływu przez ten obwód prądu elektrycznego.

### Siła elektrodynamiczna

(ang.: *electrodynamical force*) siła działająca na przewodnik z prądem umieszczony w polu magnetycznym; wartość siły elektrodynamicznej wyrażona jest wzorem:  $F_{ed} = IlB \sin \alpha$ , gdzie  $I$  jest wartością natężenia prądu w przewodniku,  $l$  - jego długością,  $B$  - wartością indukcji magnetycznej,  $\alpha$  - kątem pomiędzy kierunkiem prądu i kierunkiem linii pola magnetycznego.

### Reguła trzech palców prawej dłoni (Fleminga)

(ang.: *Fleming's rule*) mnemotechniczna reguła pozwalająca łatwo zapamiętać wzajemne ustawienie: wektora siły elektrodynamicznej, wektora indukcji magnetycznej i kierunku prądu. Obrazuje ją następujący rysunek:





# Film samouczek

---

## Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya

Być może ciekawi Cię, dlaczego w prawie Faradaya siła elektromotoryczna indukcji występuje ze znakiem minus – czemu ten znak służy.

Spróbuj uważnie prześledzić tok rozumowania zaprezentowany w samouczku.

# Trwa wczytywanie danych ..

Film dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/Dg66SyrLL>

Wysłuchaj alternatywnej ścieżki lektorskiej.

---

### Polecenie 1




Po co wprowadza się pojęcie orientacji obwodu?

### Polecenie 2

### Polecenie 3

Prawo Faradaya powinno dawać taki sam wynik niezależnie od tego, w jaki sposób skierujemy wektor powierzchni  $\vec{S}$ . Sprawdź to na przykładzie omawianym w samouczku kierując wektor  $\vec{S}$  przeciwnie niż wektor indukcji  $\vec{B}$ .

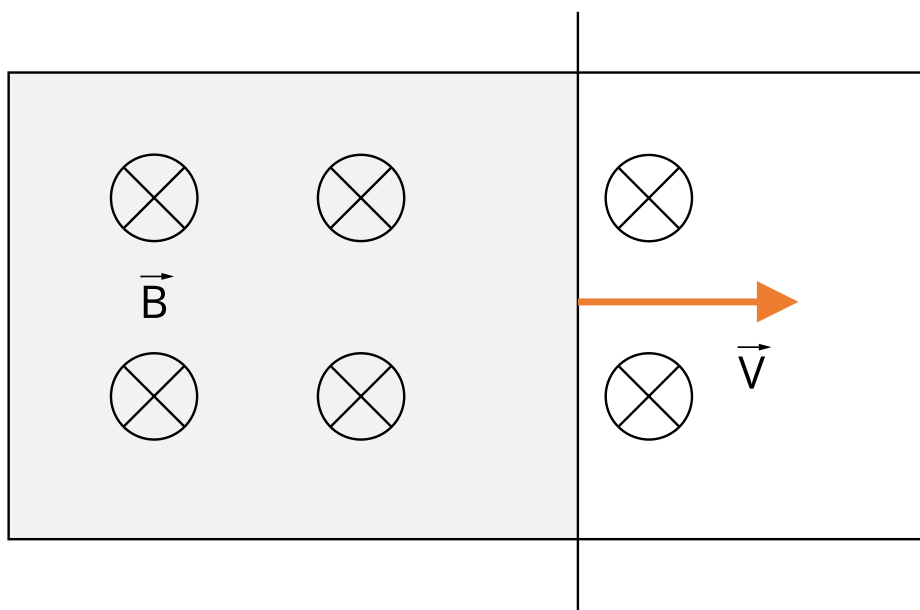
# Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

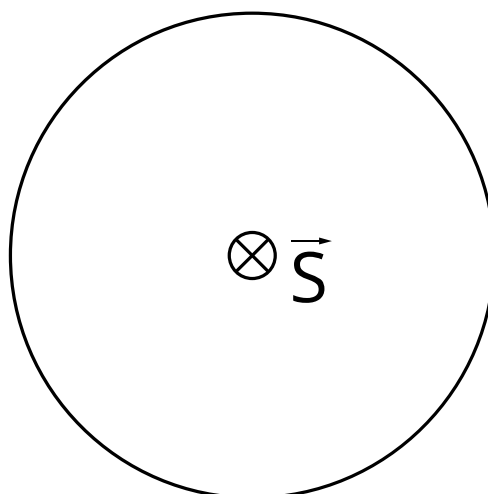
Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



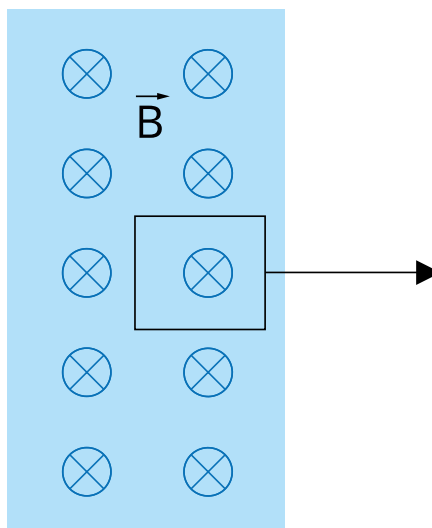
Ćwiczenie 3



#### Ćwiczenie 4



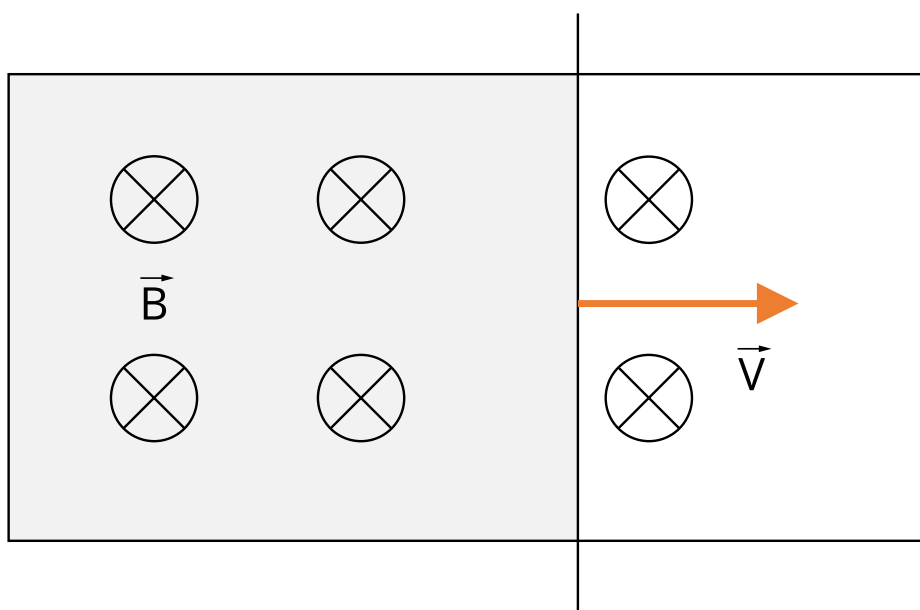
Obwód zamknięty znajduje się w obszarze pola magnetycznego. Następnie wyciągamy obwód z tego obszaru. Robimy to szybko (przypadek a)) lub powoli (przypadek b)). Rozstrzygnij, która odpowiedź jest właściwa i zaznacz ją.



#### Ćwiczenie 5



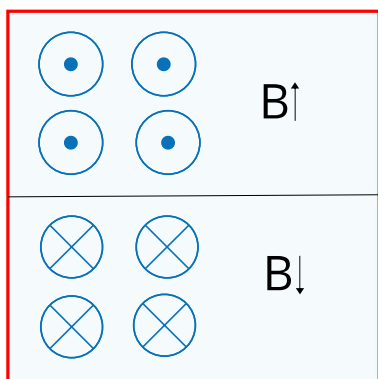
#### Ćwiczenie 6



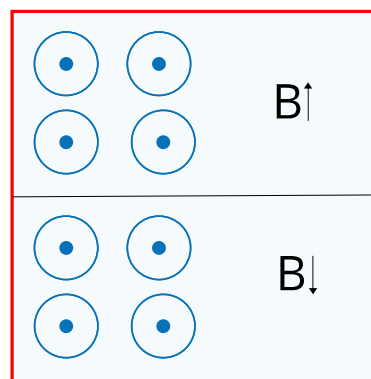
## Ćwiczenie 7



Dane są dwa identyczne obwody w kształcie kwadratu. Obszar wewnątrz każdego z kwadratów podzielony jest na pół i wypełniony polem magnetycznym o tej samej wartości indukcji  $B$ , ale niekoniecznie tak samo zwróconych wektorach (zobacz rysunek). Wartość pola magnetycznego wszędzie będzie zmieniała się w tym samym tempie. Na rysunku symbolicznie zaznaczono, czy indukcja rośnie ( $B \uparrow$ ) czy maleje ( $B \downarrow$ ).



kwadrat „a”

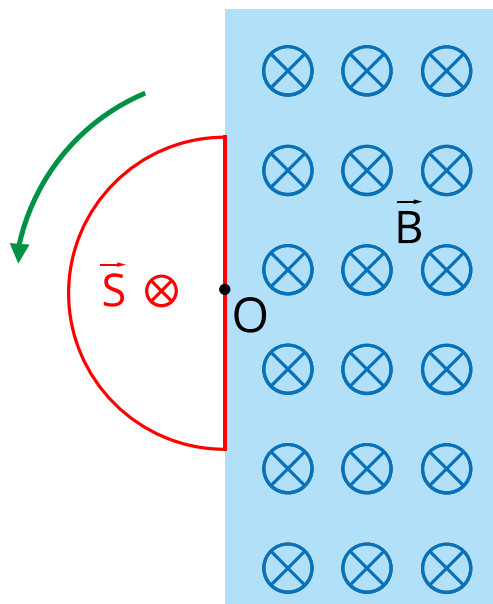


kwadrat „b”

## Ćwiczenie 8



Obwód o kształcie półokręgu znajduje się na granicy oddzielającej obszar wolny od pola magnetycznego i obszar jednorodnego pola magnetycznego o wektorach indukcji skierowanych jak na rysunku.



Obwód obraca się ze stałą prędkością kątową w stronę zaznaczoną na rysunku.

# Dla nauczyciela

---

<b>Imię i nazwisko autora:</b>	Nina Tomaszewska
<b>Przedmiot:</b>	Fizyka
<b>Temat zajęć:</b>	<b>Prawo indukcji elektromagnetycznej</b>
<b>Grupa docelowa:</b>	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
<b>Podstawa programowa:</b>	<p><b>Cele kształcenia - wymagania ogólne</b></p> <p>I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p><b>Zakres rozszerzony</b></p> <p><b>Treści nauczania - wymagania szczegółowe</b></p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 3) prowadzi obliczenia szacunkowe i poddaje analizie otrzymany wynik.</p> <p>IX. Magnetyzm. Uczeń: 10) oblicza siłę elektromotoryczną indukcji jako szybkość zmiany strumienia.</p>
<b>Kształtowane kompetencje kluczowe:</b>	<p><b>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,</li><li>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,</li><li>• kompetencje cyfrowe,</li><li>• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.</li></ul>

<b>Cele operacyjne:</b>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. omówi fundamentalne prawo fizyczne – prawo Faradaya, opisujące ilościowo zjawisko indukcji elektromagnetycznej.</li> <li>2. zastosuje to prawo do obliczania wartości natężenia prądu indukcyjnego wzbudzonego w obwodzie.</li> <li>3. wyjaśni znaczenie znaku „-” i jego związek z zasadą zachowania energii.</li> </ol>
<b>Strategie nauczania:</b>	blended-learning
<b>Metody nauczania:</b>	wykład informacyjny wspomagany pokazem multimedialnym
<b>Formy zajęć:</b>	praca w zespole klasowym
<b>Środki dydaktyczne:</b>	niniejszy e-materiał + komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
<b>Materiały pomocnicze:</b>	e-materiały: „Jak zbudowana jest i jak działa prądnica”, „Reguła Lenza a zasada zachowania energii”.
<b>PRZEBIEG LEKCJI</b>	
<b>Faza wprowadzająca:</b>	
<p>Nauczyciel nawiązuje do eksperymentów dotyczących zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Zadaje pytanie: od czego zależy wartość natężenia prądu indukcyjnego. Uczniowie przypominają sobie prądnicę i fakt, że wytwarzane w niej napięcie zależy od częstotliwości obrotów.</p> <p>Nauczyciel przypomina definicję strumienia indukcji magnetycznej oraz definicję siły elektromotorycznej indukcji.</p>	
<b>Faza realizacyjna:</b>	
<p>Nauczyciel posługując się przykładem omówionym w części „Przeczytaj” wyprowadza związek między wartością bezwzględną SEM indukcji i szybkością zmiany strumienia indukcji magnetycznej. Następnie formułuje prawo Faradaya. Uczniowie zauważają znak minus. Teraz następuje wykorzystanie samouczka – samodzielna praca uczniów. Na zakończenie tej fazy nauczyciel zadaje pytania sprawdzające np. „Po co wprowadza się pojęcie orientacji obwodu?”, „Czy prawo Faradaya w pełni opisuje zjawisko indukcji elektromagnetycznej?”.</p>	
<b>Faza podsumowująca:</b>	

W fazie podsumowującej nauczyciel wraz z uczniami powinien rozwiązać zadania: 4., 5., 6. i 7. z części „Sprawdź się”.

**Praca domowa:**

Zadania: 1., 2., 3., 8.

**Wskazówki metodyczne  
opisujące różne  
zastosowania danego  
multimedium:**

Film samouczek może być wykorzystany zgodnie ze scenariuszem, jak również może posłużyć uczniom do powtórzenia i utrwalenia wiadomości.