

The background of the slide features a series of curved, radiating lines that create a sense of depth and movement, resembling a fan or a stylized sunburst. The lines are in shades of gray and black, set against a dark background.

# 10. Elektromagnetyzm i indukcja elektromagnetyczna

---

10.1. Indukcja magnetyczna

10.2. Siła elektrodynamiczna

10.3. Siła elektromotoryczna indukcji

## Oddziaływania magnetyczne

Oddziaływania magnetyczne odkryto wcześniej niż oddziaływania elektryczne. Wiąże się to z istnieniem w przyrodzie tzw. magnesów trwałych (np. rudy żelaza – magnetytu), jak również z tym, że Ziemia zachowuje się jak wielki magnes. Magnesy wywierają działanie na żelazo i stal. Sztuczne magnesy stalowe znalazły szerokie zastosowania jako wskaźniki kierunku północnego i południowego na Ziemi (kompasy).

W początkowym okresie rozwoju magnetyzmu wprowadzono pojęcie mas magnetycznych: północnej i południowej (lub dodatniej i ujemnej), stwierdzając równocześnie niemożliwość ich rozdzielenia (zasadnicza różnica w stosunku do ładunków elektrycznych dodatnich i ujemnych).

Obecnie istnienie pól magnetycznych jest traktowane, jako skutek ruchu ładunków elektrycznych. W chwili obecnej obowiązuje pogląd, że **wszelki przepływ prądu elektrycznego powoduje powstanie pola magnetycznego**. Jest to zjawisko niezależne od natury prądu je wywołującego: może to być prąd elektronowy w przewodniku metalicznym, prąd jonowy w elektrolicie, czy prąd w gazie. Pole magnetyczne towarzyszy też ruchowi elektronów w atomie, ruchowi jąder atomowych w cząsteczkach itd.

Do charakterystyki wektorowej pola magnetycznego (podobnie jak dla pola elektrycznego) wykorzystuje się dwa wektory, a mianowicie: **wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$**  oraz **wektor natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$** .

## 10.1. Indukcja magnetyczna

Z doświadczenia wiemy, że źródłami sił magnetycznych są:

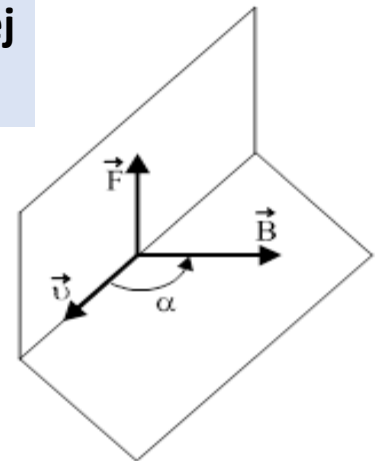
- magnesy stałe (np. magnesy sztabkowe),
- przewodniki, w których płynie prąd elektryczny (np. solenoid),
- poruszające się ładunki elektryczne (np. elektrony w lampie kineskopowej telewizora).

**Jeżeli w przestrzeni działają siły na przewodniki z prądem, poruszające się ładunki elektryczne lub bieguny magnesu to mówimy, że w przestrzeni istnieje pole magnetyczne.**

Założmy, że w polu magnetycznym porusza się z prędkością  $\vec{v}$  ładunek próbny  $q_0$ . Okazuje się, że pole magnetyczne działa na poruszający się ładunek elektryczny siłą  $\vec{F}$ . Zmieniając prędkość  $\vec{v}$  ładunku próbnego, można stwierdzić, że niezależnie od kierunku jego prędkości  $\vec{v}$ , siła  $\vec{F}$  jest zawsze do niej prostopadła, natomiast wartość bezwzględna siły zależy od wartości i od kierunku prędkości. Zawsze można znaleźć taki kierunek prędkości, aby wartość siły była maksymalna oraz taki kierunek – prostopadły do poprzedniego – aby siła była równa zero. Zależność siły  $\vec{F}$  od prędkości  $\vec{v}$  ładunku próbnego  $q_0$  można wyrazić prostym wzorem, jeśli wprowadzimy wektor  $\vec{B}$  opisujący pole magnetyczne, zwany wektorem indukcji magnetycznej. Wektor ten definiujemy następująco:

**W przestrzeni istnieje pole magnetyczne o indukcji  $\vec{B}$ , jeżeli na ładunek próbny  $q_0$  poruszający się w tej przestrzeni z prędkością  $\vec{v}$  działa siła  $\vec{F}$ :  $F = q_0 v B \sin \alpha$ , gdzie  $\alpha$  to kąt pomiędzy wektorami  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$ .**

Związki między wektorami  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  i  $\vec{F}$  przedstawiono na rysunku. Wektor  $\vec{F}$  jest prostopadły do wektorów  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$ . Wartość siły jest maksymalna, gdy  $\vec{v} \perp \vec{B}$ . Gdy wektory  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$  są do siebie równoległe to siła  $\vec{F} = 0$ . Zwróćmy uwagę, że w odróżnieniu od siły elektrycznej **siła magnetyczna działa tylko na ładunki w ruchu** oraz, że **jej kierunek jest zawsze prostopadły do kierunku wektora  $\vec{B}$** . Siłę magnetyczną wyrażoną powyższym wzorem nazywamy często **siłą Lorenza**, a sam wzór – **wzorem Lorenza**.



### Przykład 10.1.

Elektron o masie  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg i ładunku elektrycznym  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C wpada z prędkością  $v = 10^7$  m/s w obszar jednorodnego pola magnetycznego o indukcji  $B = 10^{-2}$  T prostopadle do linii sił tego pola. Znaleźć tor ruchu elektronu w polu magnetycznym.

#### Rozwiązanie:

Na elektron działa siła Lorentza  $\vec{F}_L$  tak, jak siła dośrodkowa ( $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ ), a więc zakrzywia tor elektronu.

$$F_L = |\vec{F}_L| = evB$$

która jest skierowana prostopadle do wektorów  $\vec{B}$  i  $\vec{v}$ .

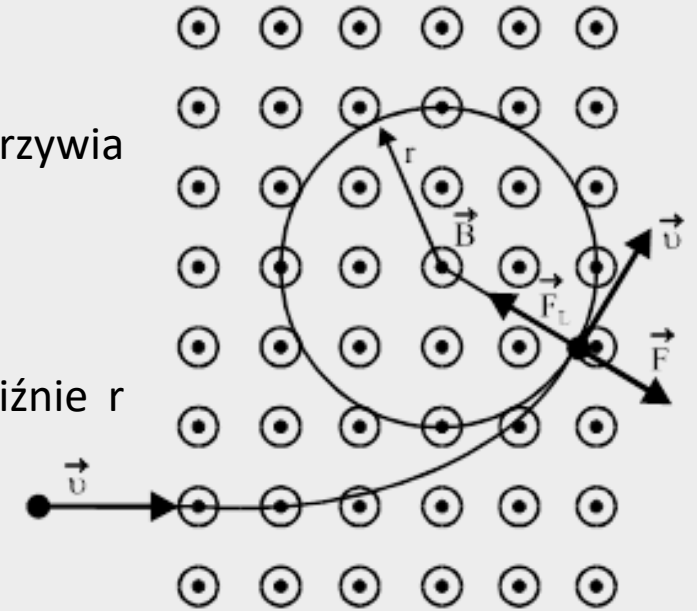
Jednocześnie na poruszający się elektron o masie  $m$  z prędkością  $v$  po torze o krzywiznie  $r$  działa wzdłuż tej samej prostej co siła  $F_L$  ale w przeciwnym kierunku siła odśrodkowa  $F$

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

Zatem elektron w jednorodnym polu magnetycznym zadania będzie poruszał się po okręgu o promieniu  $r$  w płaszczyźnie prostopadłej do  $\vec{B}$ . Promień tego okręgu wyliczymy z warunku:

$$F_L = F \quad \text{czyli} \quad evB = m \frac{v^2}{r} \quad \text{stąd} \quad r = \frac{mv}{eB}$$

$$\text{Obliczamy promień: } r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^7 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 10^{-2} \text{ T}} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



Sprawdzamy jednostki:

$$\text{ponieważ } [T] = \left[ \frac{N}{C \cdot m/s} \right]; [N] = [kg \cdot m/s^2]$$

$$\frac{kg \cdot m/s}{C \cdot T} = \frac{kg \cdot m/s \cdot C \cdot m/s}{C \cdot N} = \frac{kg \cdot m/s^2 \cdot m}{kg \cdot m/s^2} = m$$

Odpowiedź: Elektron będzie poruszał się po okręgu o promieniu  $r = 5,7$  mm.

## 10.2. Siła elektrodynamiczna

Ponieważ prąd elektryczny jest uporządkowanym przepływem ładunków elektrycznych, więc należy się spodziewać, że pole magnetyczne będzie wywierać siłę na przewodnik, w którym płynie prąd.

**Siłę tą nazywamy siłą elektrodynamiczną.**

$$\vec{F} = \vec{B} \cdot \vec{I} \cdot l$$

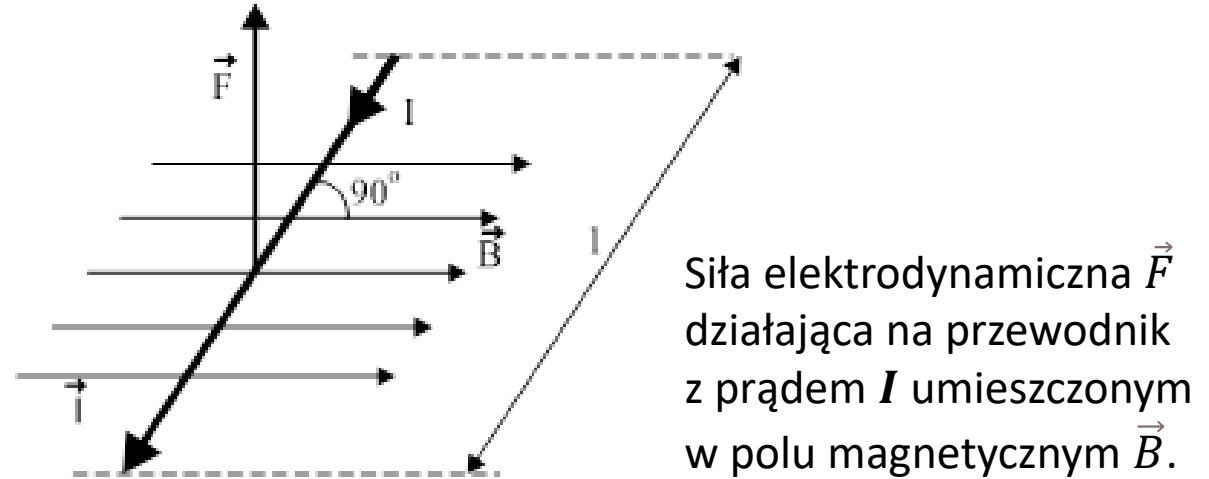
Wzór ten wyraża siłę  $\vec{F}$  działającą na prostoliniowy przewodnik z prądem w przypadku prostokątnego ustawienia  $\vec{l}$  i  $\vec{B}$ . W przypadku ogólnym prostoliniowego przewodnika o długości  $l$  tworzącego dowolny kąt  $\alpha$  z wektorem indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  siła  $\vec{F}$  wyraża się wzorem:

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

W celu obliczenia siły pochodzącej od jednorodnego pola i działającej na odcinek  $l$  przewodu, przez który płynie prąd o natężeniu  $I$ , rozważmy początkowo przypadek, gdy przewodnik umieszczony jest prostopadle do  $\vec{B}$ . W tych warunkach siła  $\vec{F}$ , działająca na każdy z nośników prądu, będzie jednakowo skierowana (prostopadle do  $\vec{v}$  i do  $\vec{B}$ ) i równa  $F' = evB$ . A zatem siła wypadkowa będzie równa sumie arytmetycznej sił działających na wszystkie nośniki znajdujące się w rozważanym odcinku przewodu. Przyjmując, że gęstość nośników prądu (liczba nośników w jednostce objętości) jest  $n$ , znajdziemy, że ogólna ich liczba w odcinku  $l$  przewodu o przekroju  $S$  wynosi  $n l S$ .

Siła wypadkowa jest więc równa

$$F = n l S F' = n l S e v B = B \cdot e n S v \cdot l$$



Warto tu podkreślić, że występująca we wzorze prędkość  $v$  jest prędkością średnią ruchu poszczególnych nośników prądu (a nie np. prędkością ruchu przewodnika jako całości).

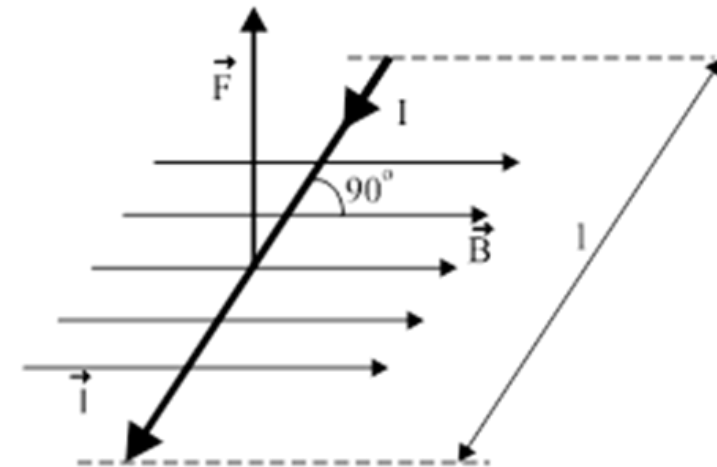
Z kolei natężenie prądu  $I$  płynącego w przewodniku można określić jako ładunek  $Q$  przepływający w jednostce czasu  $t$  przez przekrój poprzeczny  $S$  tego przewodnika, a więc natężenie prądu możemy zapisać:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{e \cdot n \cdot S \cdot l}{t} = enSv$$

Korzystając z powyższego wyrażenia wzór na siłę wypadkową  $F = B \cdot enSv \cdot l$  przyjmuje postać:

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{l}$$

Zwróćmy uwagę na istotną osobiwość sił oddziaływania elektromagnetycznego, wyrażającą się wzorem na siłę elektrodynamiczną (wzorem Ampera). W elektrostatyce mieliśmy do czynienia z siłami centralnymi, ponieważ siła oddziaływania dwóch ładunków punktowych jest skierowana wzdłuż prostej łączącej te ładunki. Tymczasem siły oddziaływania elektromagnetycznego – jak to wynika z wzoru Ampera, nie są siłami centralnymi, są one zawsze skierowane prostopadle do linii sił pola magnetycznego.





## 10.3. Siła elektromotoryczna indukcji

### Odkrycia Faradaya

W roku 1820 Oersted stwierdził, że przepływ prądu elektrycznego  $I$ , wytwarza w przestrzeni wokół siebie pole magnetyczne o indukcji  $\vec{B}$ . Natychmiast po tym wydarzeniu, zaczęto zastanawiać się – czy zachodzi zjawisko odwrotne, czyli czy pole magnetyczne  $\vec{B}$  wytwarza pole elektryczne  $\vec{E}$  (prąd elektryczny), a jeśli tak, to jakie prawa rządzą tym procesem.

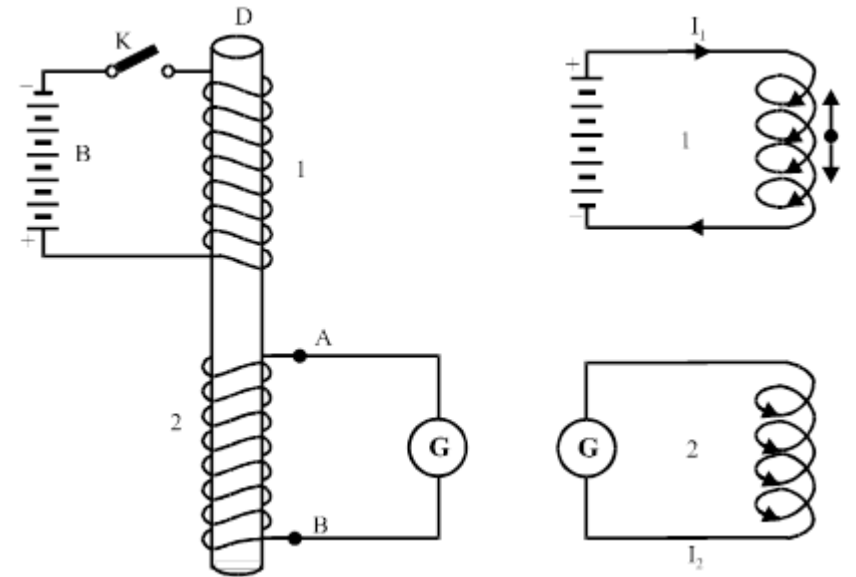
W 1831 roku, po dziesięciu latach wytrwałych prób, Faradayowi udało się rozwiązać to zagadnienie. Wykonał eksperyment, który miał w następstwie olbrzymie znaczenie dla rozwoju fizyki i techniki. Na zjawisku tym bowiem opiera się m.in. działanie praktycznie wszystkich współczesnych źródeł energii elektrycznej (z wyjątkiem instalacji fotowoltaicznych). Schemat doświadczenia przedstawia rysunek.

Na drewniany pręt D nawinięte są dwa długie druty miedziane. Przy nie zmieniającym się natężeniu prądu w pierwszym obwodzie, w drugim obwodzie galwanometr G nie wskazywał prądu, natomiast w czasie zwierania i rozwierania wyłącznika K wskazówka galwanometru G odchyłała się nieco, a następnie wracała szybko do położenia równowagi.

Wynik tego eksperymentu świadczy o powstaniu w drugim obwodzie krótkotrwałego prądu nazwanego później prądem indukcyjnym.

**Prąd indukcyjny w obwodzie drugim płynął na skutek powstania napięcia między punktami A i B, zwanego siłą elektromotoryczną indukcji (którą oznaczamy SEM).**

Kierunki prądów indukowanych były dla przypadku zwierania i rozwierania przeciwne. Zamiast stosować gwałtowne zmiany prądu przy użyciu klucza K Faraday wskazał, iż prąd indukowany wytwarza się również przy łagodnych zmianach prądu w obwodzie 1, uzyskanych przy pomocy opornika o zmiennym oporze.



## Reguła Lenza

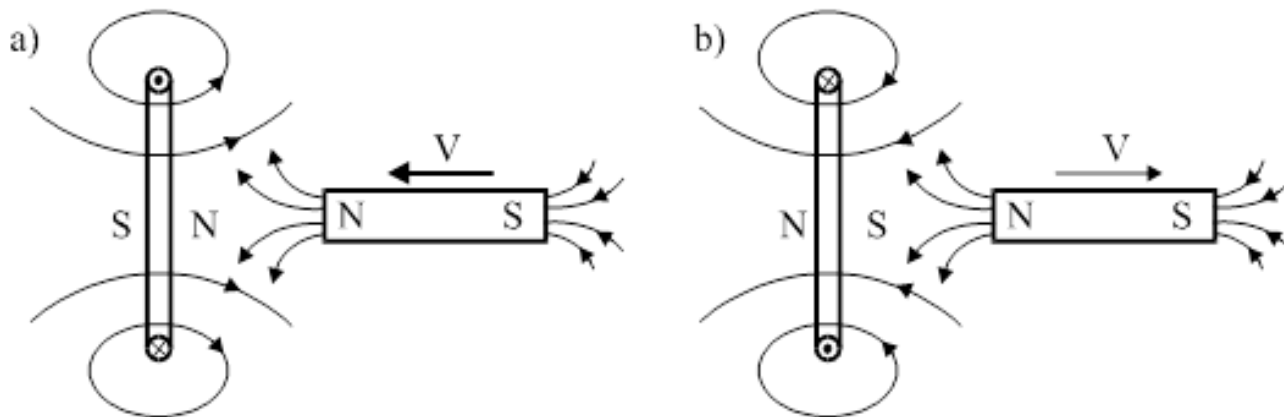
Ostatecznie SEM indukowana w pręcie wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}, \text{ gdzie } \Phi_B = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

Otrzymany tu związek jest również słuszny dla obwodu zamkniętego i stanowi podstawowe prawo indukcji elektromagnetycznej zwane prawem Faradaya. Prawo to mówi, że:

**SEM indukowana w obwodzie (konturze zamkniętym) jest proporcjonalna do szybkości zmiany strumienia pola magnetycznego w danym obwodzie.**

Znak minus we wzorze nawiązuje do reguły Lenza, która mówi, że kierunek prądu indukowanego w obwodzie jest zawsze taki, że pole magnetyczne prądu wywołane przeciwstawia się zmianie strumienia magnetycznego, który wywołał pojawienie się prądu indukcyjnego.



Prąd indukowany w obwodzie ma taki kierunek, że wytwarzane przez ten prąd własne pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która go wywołuje. Gdy zbliżamy magnes to strumień rośnie, więc indukowane pole magnetyczne jest skierowane przeciwnie do pola magnesu, gdy oddalamy oba pola są zgodne.



### Przykład 10.2.

Pręt porusza się po szynach w jednorodnym z prędkością  $v = 2 \text{ m/s}$  polu magnetycznym o indukcji  $B = 0,1 \text{ T}$  prostopadle do linii sił tego pola. Pole skierowane jest w głąb ekranu, a odległość pomiędzy szynami wynosi  $d = 0,9 \text{ m}$ . Jak wielka siła elektromotoryczna SEM zaindukuje się w obwodzie przedstawionym na rysunku i w którą stronę popłynie indukowany prąd?

#### Rozwiązanie:

Zgodnie z prawem indukcji Faradaya SEM indukowana w obwodzie wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad \text{gdzie} \quad \Phi_B = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad S = d \cdot x.$$

W naszym przykładzie wektor  $\vec{B}$  jest równoległy do wektora  $\vec{S}$  więc  $\alpha = 0$ , a  $\cos 0 = 1$ . Oznaczając położenie początkowe pręta przez  $x_0$  jego położenie  $x$  w dowolnej chwili czasu  $t$  będzie wynosiło:

$$x = x_0 + vt$$

Zatem powierzchnia obwodu, a tym samym strumień indukcji magnetycznej będzie zwiększał się w czasie:  $\Phi_B(t) = B \cdot d \cdot (x_0 + vt)$

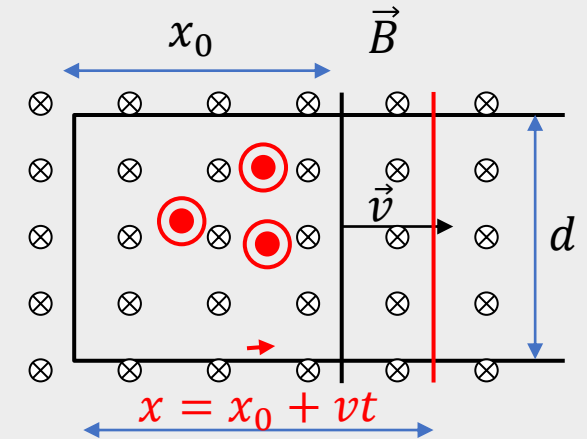
Zmiana strumienia w czasie  $\Delta t = t$ :

$$\Delta \Phi_B = \Phi_B(t) - \Phi_B(0) = B \cdot d \cdot (x_0 + vt) - B \cdot d \cdot x_0 = B \cdot d \cdot v_0 \cdot t$$

$$\text{Obliczamy SEM: } \varepsilon = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = - \frac{B \cdot d \cdot v \cdot t}{t} = -B \cdot d \cdot v = -0,1 \text{ T} \cdot 0,9 \text{ m} \cdot 2 \text{ m/s} = -0,18 \text{ V}$$

Strumień rośnie więc zgodnie z regułą Lenza prąd indukowany musi płynąć w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara aby wytworzone przez niego pole było przeciwnie skierowane do  $\vec{B}$ .

Odpowiedź: SEM = - 0,18 V i prąd indukowany popłynie w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara.



Sprawdzamy jednostki:

$$\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s} = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s}}{\text{C} \cdot \text{m/s}} = \frac{\text{W}}{\text{C}} = \text{V}$$