



## Co to jest siła elektrodynamiczna?

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



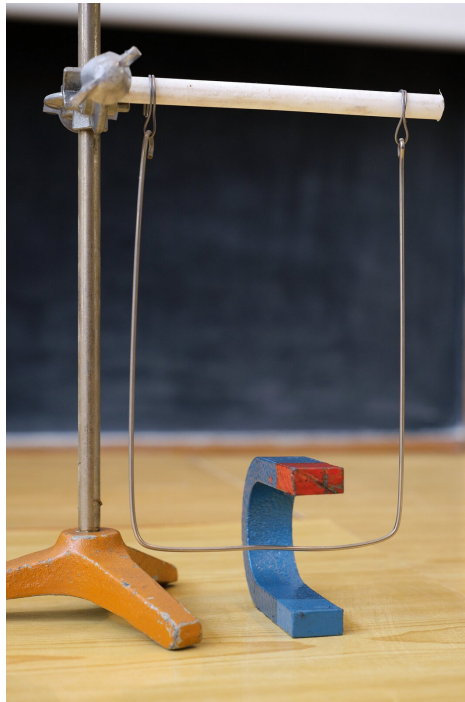
## Co to jest siła elektrodynamiczna?

Źródło: dostępny w internecie: <https://www.shutterstock.com/image-photo/detail-electronic-conductor-dark-back-171568955> [dostęp 15.05.2022].

### Czy to nie ciekawe?

Zapewne już wiesz, że na ładunek poruszający się w polu magnetycznym działa siła, zwana siłą Lorentza. Pewnie również wiadomo Ci, co to jest prąd elektryczny. Mówimy, że to uporządkowany (ukierunkowany) ruch ładunków. Masz prawo podejrzewać, łącząc te dwa fakty, że na przewodnik, w którym płynie prąd, znajdujący się w polu magnetycznym, działa siła, która jest wypadkową sił działających na poszczególne poruszające się ładunki.

Możesz łatwo sprawdzić tę hipotezę, budując na przykład układ pokazany na zdjęciu (Rys. a.) i podłączając baterijkę do zacisków widocznych powyżej białego walcowatego uchwytu. Wtedy w „huśtawce” popłynie prąd. Część pozioma przewodnika znajdzie się w obrębie silnego pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes podkowiasty.



Rys. a. Zestaw doświadczalny do demonstrowania działania siły elektrodynamicznej.

Źródło: Martyna Jakubowska, Maciej J. Mrowiński, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

O wyniku eksperymentu i o występującej w takich przypadkach sile, zwanej siłą elektrodynamiczną, przeczytasz w tym e-materiale.

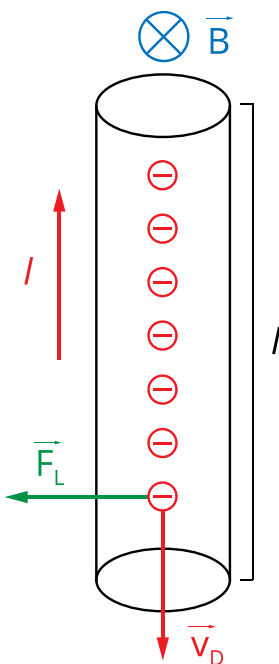
### **Twoje cele**

- przekonasz się, że siła elektrodynamiczna jest skutkiem działania siły Lorentza na nośniki prądu;
- zrozumiesz wyprowadzenie wzoru opisującego wartość siły elektrodynamicznej;
- przećwiczysz zastosowania tego wzoru oraz nauczysz się wyznaczać kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.

# Przeczytaj

## Warto przeczytać

Wyobraź sobie przewodnik, w którym płynie stały prąd o natężeniu  $I$ . Jak wiesz, umówiono się, że jego nośnikami są ładunki dodatnie i z tego wynika powszechnie przyjęty kierunek prądu elektrycznego. W istocie, w metalach są nimi jednak elektrony. Poruszają się one w przewodniku z prędkością dryfu  $\vec{v}_D$ . Każdy obdarzony jest ładunkiem elementarnym  $e$  o ujemnym znaku.



Rys. 1. Na poruszające się elektrony w przewodniku, umieszczonym w jednorodnym polu magnetycznym, działa siła Lorentza. Kierunek prądu jest taki, jakby jego nośnikami były ładunki dodatnie.

Na Rys. 1. symbolicznie pokazano dryfujące elektrony w przewodniku, który został wprowadzony w **pole magnetyczne** o indukcji  $\vec{B}$ . Wektor indukcji zaznaczono, dla przejrzystości rysunku, tylko na górze, ale pole magnetyczne jest **jednorodne** i występuje wszędzie. Zauważmy, że na każdy elektron działa **siła magnetyczna** Lorentza skierowana w lewo. Przypomnijmy, że określa ją równanie wektorowe:

$$\vec{F}_{mag} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

gdzie  $q$  jest ładunkiem elektrycznym (z uwzględnieniem znaku),  $\vec{v}$  - wektorem prędkości ładunku a  $\vec{B}$  - wektorem indukcji magnetycznej w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

Wartość całkowitej siły wypadkowej działającej na fragment przewodnika o długości  $l$  (zwanej siłą elektrodynamiczną) jest sumą wartości wszystkich identycznych sił Lorentza,

działających na każdy poruszający się ładunek znajdujący się w tym fragmencie przewodnika. Zapiszmy:

$$F_{ed} = \sum_{i=1}^n F_{Li} = n \cdot ev_D B$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę elektronów w rozważanym fragmencie przewodnika.

Skorzystamy teraz z definicji natężenia prądu:  $I = \frac{q}{t} = \frac{ne}{t}$ , gdzie  $t$  jest czasem, w ciągu którego  $n$  elektronów przejdzie przez przekrój (na przykład górny) przewodnika. Wszystkie elektrony poruszające się w przewodniku, niczym kolumna żołnierzy, przebędą w tym czasie odległość  $l$ . Możemy zatem obliczyć  $t$  jako iloraz przemieszczenia  $l$  i prędkości dryfu nośników:  $t = \frac{l}{v_D}$ . Podstawmy wyliczony czas do wyrażenia opisującego natężenie prądu. Otrzymamy:  $I = \frac{ne}{t} = \frac{nev_D}{l}$ . Pozwoli nam to wprowadzić natężenie prądu do wyrażenia (2) opisującego siłę elektrodynamiczną. Uzyskamy wartość tej siły, zależną od makroskopowych wielkości fizycznych: natężenia prądu, długości przewodnika i indukcji magnetycznej.

$$F_{ed} = IlB$$

Rozważyliśmy tutaj pewien przypadek szczególny – sytuację, gdy wektor indukcji magnetycznej jest prostopadły do prędkości dryfu elektronów. Wiemy, że w ogólnym przypadku, wartość siły Lorentza opisana jest zależnością:  $F_L = qvB \cdot \sin \angle(\vec{v}, \vec{B})$ . Wobec tego zmieni się odpowiednio również zapis wartości siły elektrodynamicznej.

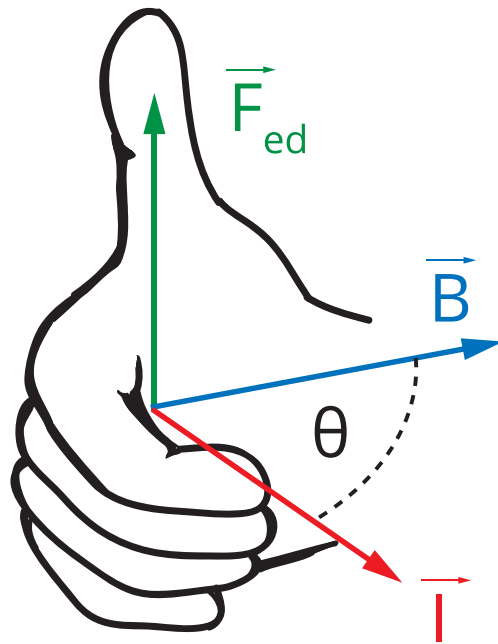
$$F_{ed} = IlB \cdot \sin \angle(\vec{l}, \vec{B})$$

Występujący w tej zależności wektor  $\vec{l}$  jest wektorem o wartości równej długości przewodnika  $l$  i kierunku oraz zwrocie zgodnym z kierunkiem prądu w przewodniku.

Ostatecznie, wektor siły elektrodynamicznej zapiszemy analogicznie do zapisu wektorowego siły Lorentza, jako iloczyn wektorowy:

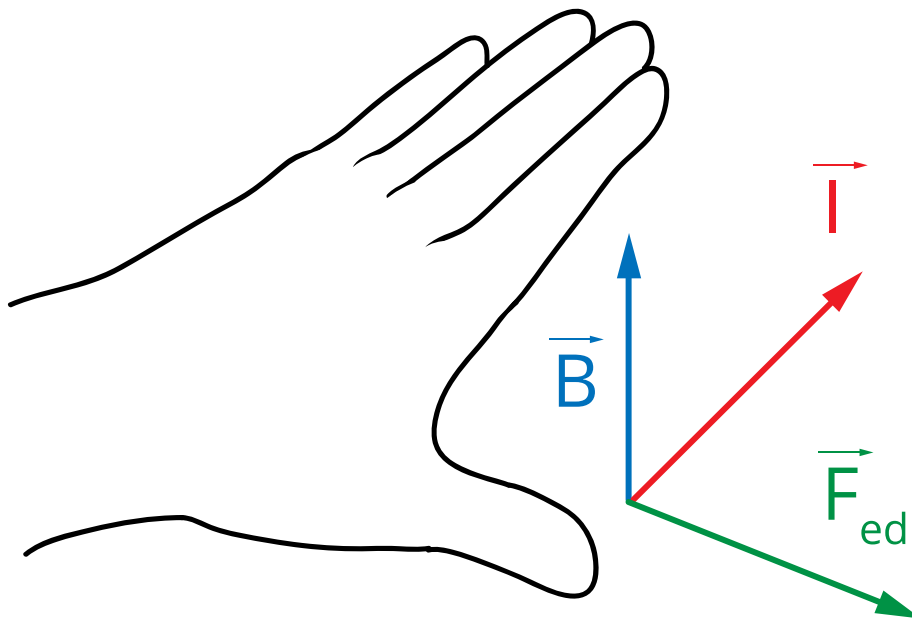
$$\vec{F}_{ed} = I \vec{l} \times \vec{B}$$

Przypomnijmy, że z właściwości iloczynu wektorowego wynika, że wektor  $\vec{F}_{ed}$  jest prostopadły zarówno do wektora  $\vec{l}$  jak i do wektora  $\vec{B}$ . Zwrot siły elektrodynamicznej wyznaczamy za pomocą reguły śruby prawoskrętnej, co pokazano na Rys. 2.



Rys. 2. Reguła śruby prawoskrętnej (albo prawej dłoni).

Niektórzy uczniowie wolą wyznaczać kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej korzystając z reguły lewej dłoni, przedstawionej na Rys. 3. Jest ona oczywiście tożsama z regułą śruby prawoskrętnej.

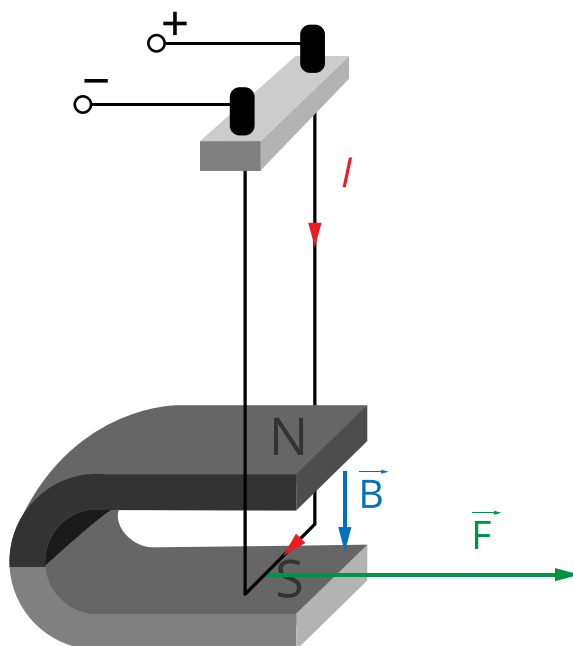


Rys. 3. Reguła lewej dłoni.

Jeśli lewą dłoń skierujemy czterema palcami wzdłuż przewodnika w kierunku przepływającego prądu, a linie pola magnetycznego będą „wchodziły” w dłoń, to kciuk pokaże kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.

Pozostało nam wyjaśnienie zasady działania „huśtawki”, o której mówiliśmy w części wstępnej. Teraz łatwo już odpowiedzieć na pytanie, jak się ona zachowa, gdy włączymy

prąd elektryczny.



Rys. 4. Siła elektrodynamiczna działająca na fragment „huśtawki” umieszczony w polu magnetycznym.

Na Rys. 4. narysowane są odpowiednie wektory. Widzimy, że siła elektrodynamiczna w tym przypadku skierowana jest w prawo i tak też wychyli się „huśtawka”.

## Słowniczek

### Pole magnetyczne

(ang. *magnetic field*) – stan przestrzeni charakteryzujący się działaniem siły, zwanej siłą magnetyczną (Lorentza) na poruszający się ładunek umieszczony w tej przestrzeni bądź na obiekt obdarzony momentem magnetycznym; wielkością charakteryzującą pole magnetyczne jest wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$ .

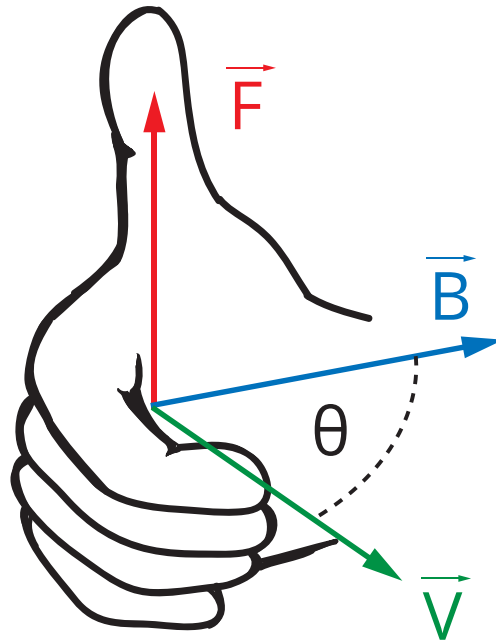
### Linie pola magnetycznego

(ang. *magnetic line of induction*) – poglądowy obraz pola magnetycznego. Przebieg linii odzwierciedla układ wektorów indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  w przestrzeni. W każdym punkcie linii pola zaczepiony jest wektor  $\vec{B}$ , styczny do tej linii.

### Siła magnetyczna

(ang.: *magnetic force*) – inaczej zwana częścią magnetyczną siły Lorentza - siła działająca na poruszający się ładunek znajdujący się w polu magnetycznym, opisana równaniem wektorowym  $\vec{F}_{mag} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ , gdzie  $q$  jest ładunkiem elektrycznym (z uwzględnieniem znaku),  $\vec{v}$  - wektorem prędkości ładunku a  $\vec{B}$  - wektorem indukcji magnetycznej w punkcie, w którym znajduje się ładunek.

Wartość tej siły jest równa:  $F_{mag} = |q|vB \sin \angle(\vec{v}, \vec{B})$ , a jej kierunek i zwrot wyznacza reguła śruby prawoskrętnej, zwana także regułą prawej dłoni, symbolicznie pokazaną na rysunku.



### Pole jednorodne

(ang.: *uniform field*) – pole fizyczne (na przykład grawitacyjne, elektryczne, magnetyczne), którego natężenie jest takie samo w każdym punkcie, (to znaczy, ma taką samą wartość, kierunek i zwrot). Linie pola jednorodnego są prostymi równoległymi do siebie.

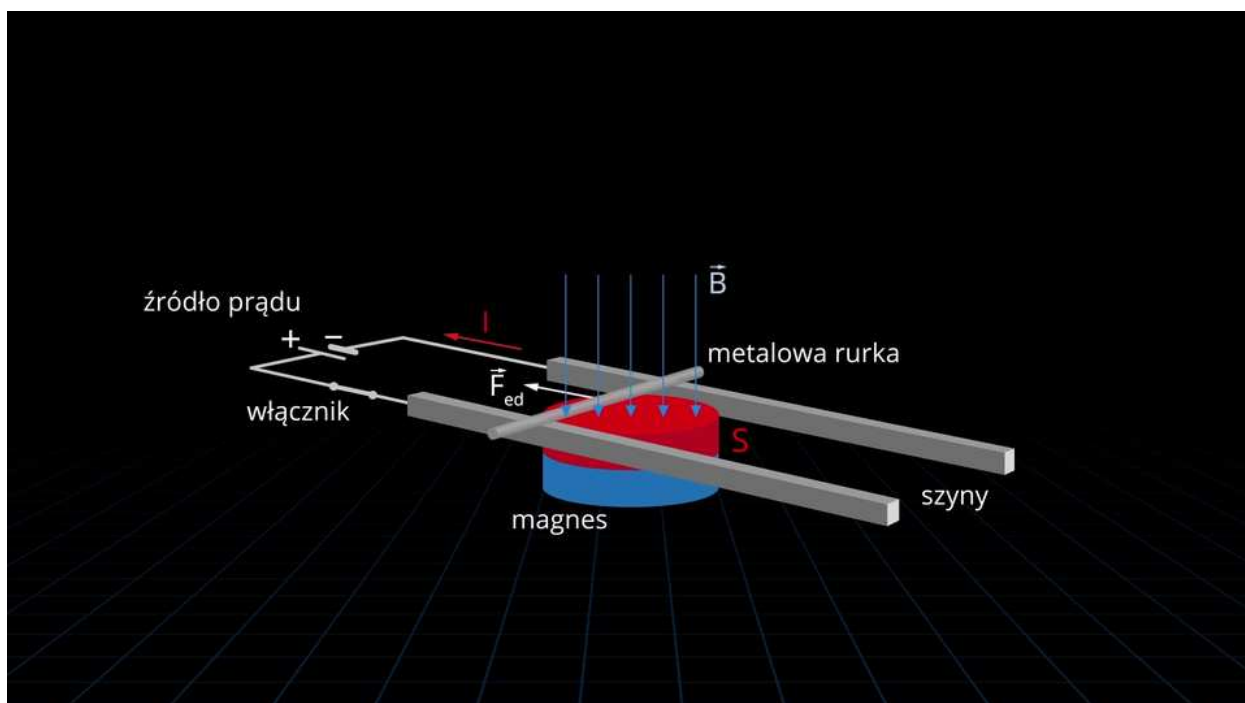
# Animacja

---

## Co to jest siła elektrodynamiczna?

Animacja przedstawia ideę działania elektrycznego silnika liniowego. Zobaczysz najprostszy model pojazdu, który porusza się ruchem postępowym bez użycia przekładni transformującej ruch obrotowy na postępowy (czyli na przykład koła). Taki napęd stosowany jest między innymi w magnetycznej kolei dużych prędkości.

## Trwa wczytywanie danych...



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1ckjd1HGB2GR>

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Zapoznaj się z audiodeskrypcją animacji.

---




## **Polecenie 1**

## **Polecenie 2**

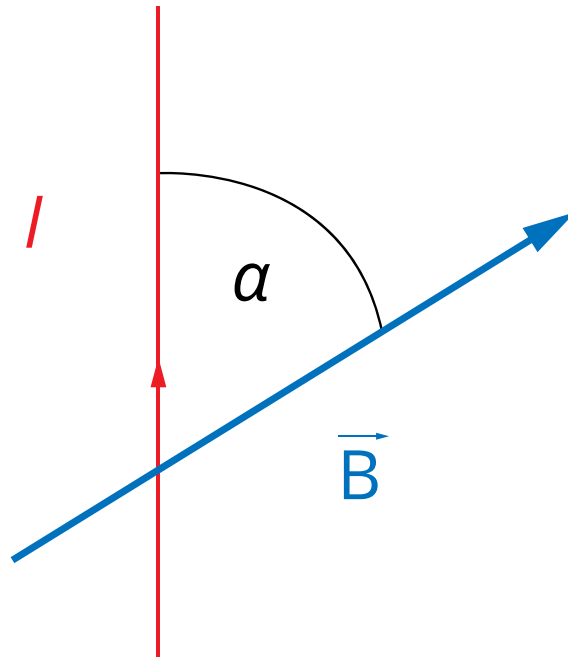
Jak zmieniłoby się działanie modelu silnika liniowego, gdyby poprzeczka leżąca na torach była wykonana z plastiku?

# Sprawdź się

---

Pokaż ćwiczenia:   

## Ćwiczenie 1



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 2

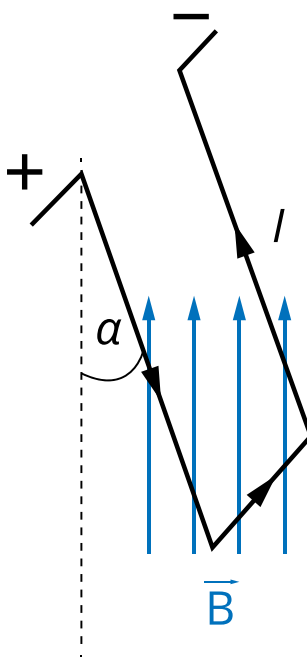


Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

### Ćwiczenie 3



Na nieważkich przewodach zawieszona jest przewodząca poprzeczka, tworząc swego rodzaju huśtawkę. W huśtawce płynie prąd w kierunku zaznaczonym na rysunku. Po wprowadzeniu huśtawki w obszar jednorodnego pola magnetycznego (skierowanego, jak na rysunku) huśtawka odchyli się od pionu. Jakie siły będą działały na przewody podtrzymujące huśtawkę w chwili włączenia pola magnetycznego (gdy huśtawka wisi jeszcze pionowo), a jakie, gdy odchyli się ona już od pionu? Odpowiedź wpisz w formularzu lub narysuj na kartce.



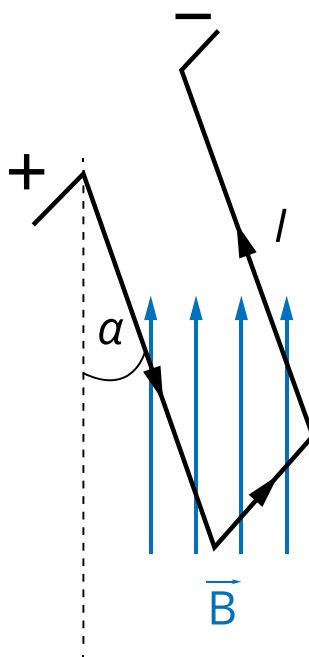
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 4



Na nieważkich przewodach zawieszona jest przewodząca poprzeczka o długości  $l = 10$  cm i masie  $m = 0,01$  kg, tworząc swego rodzaju huśtawkę (zobacz rysunek).

W huśtawce płynie prąd o natężeniu  $I = 2$  A. Po wprowadzeniu huśtawki w obszar jednorodnego pola magnetycznego odchyliła się ona od pionu o kąt  $\alpha = 15^\circ$ .

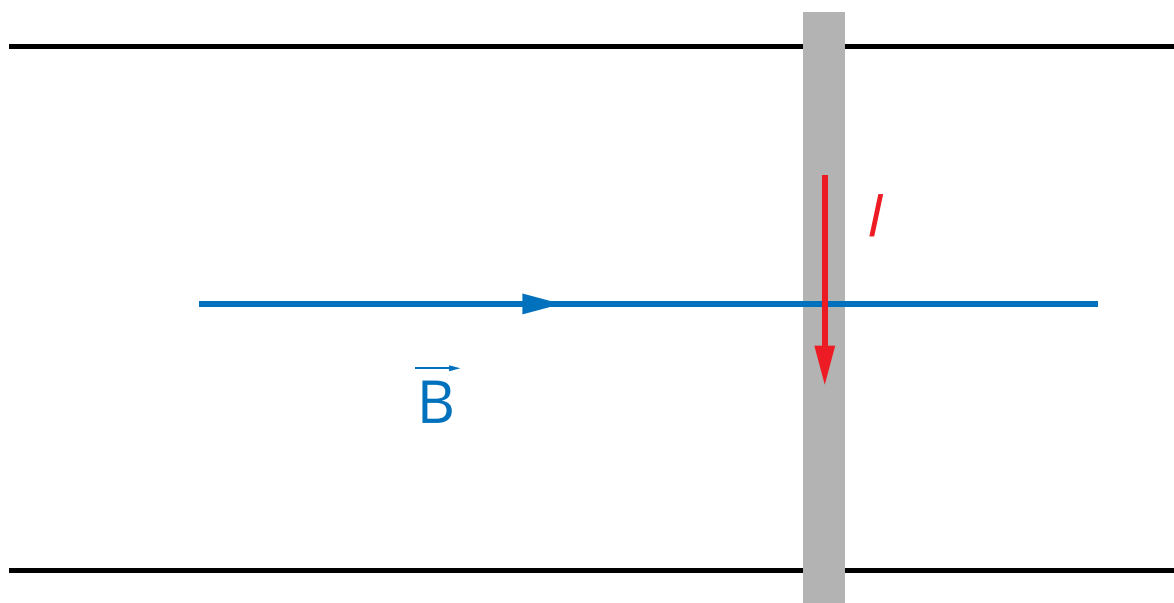


Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 5

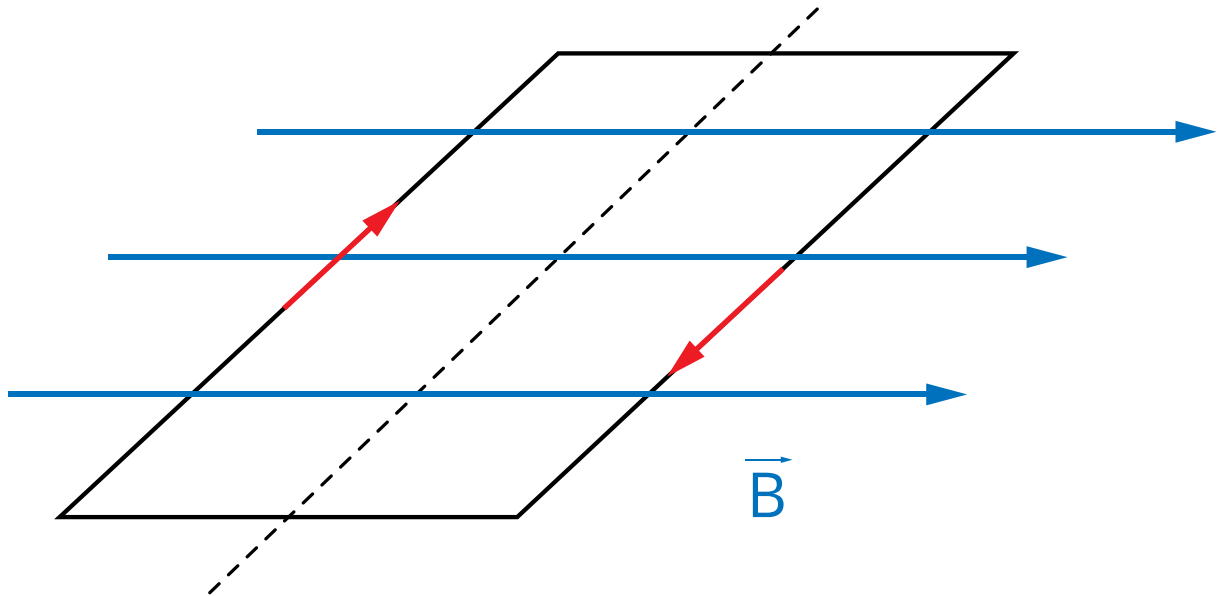


Pręt o masie  $m = 0,5$  kg leży na poziomych szynach odległych od siebie o  $l = 1$  m. Cały układ znajduje się w jednorodnym polu magnetycznym o liniach prostopadłych do pręta i równoległych do płaszczyzny wyznaczonej przez szyny (zobacz rysunek, na którym przedstawiono widok z góry). Wartość indukcji  $B = 0,5$  T. Aby poruszyć pręt podczas przepływu prądu o natężeniu  $1$  A, należy użyć siły  $F_1 = 27$  N. Wyznacz wartość siły  $F_2$  koniecznej do wprowadzenia pręta w ruch, gdy prąd będzie płynął w przeciwną stronę. Dla uproszczenia rachunków przyjmij, że przyspieszenie ziemskie  $g = 10 \frac{m}{s^2}$ .



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 6



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 7

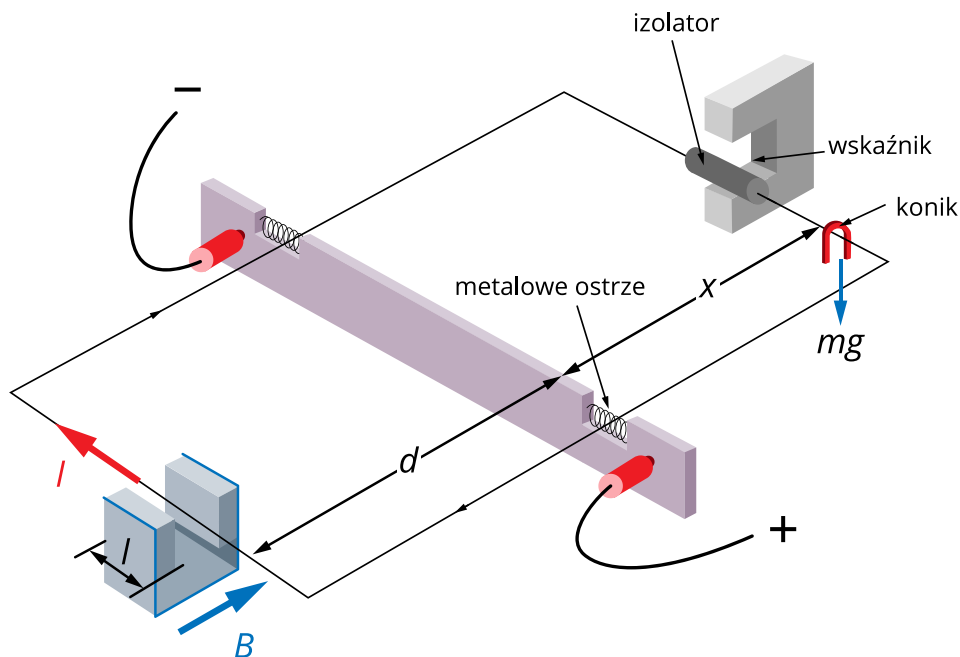


Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

## Ćwiczenie 8



Opisz, w jaki sposób przedstawiona na rysunku waga prądowa pozwala zmierzyć wartość indukcji magnetycznej  $B$  w obszarze pomiędzy biegunami magnesu podkowiastego znajdującego się po lewej stronie. Na rysunku nie jest widoczny amperomierz, którym możemy mierzyć natężenie prądu płynącego w obwodzie. Zauważ, że prąd płynie jedynie w lewej części ramki. Widoczny po prawej stronie „konik” jest małym obciążnikiem.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

# Dla nauczyciela

---

<b>Imię i nazwisko autora:</b>	Nina Tomaszewska
<b>Przedmiot:</b>	Fizyka
<b>Temat zajęć:</b>	<b>Co to jest siła elektrodynamiczna?</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>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:</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach.</p> <p>IX. Magnetyzm. Uczeń:</p> <p>2) posługuje się pojęciem wektora indukcji magnetycznej wraz z jego jednostką, analizuje oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem oraz na poruszającą się cząstkę naładowaną (siła Lorentza, siła elektrodynamiczna); opisuje rolę pola magnetycznego Ziemi jako osłony przed wiatrem słonecznym.</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 cyfrowe,</li><li>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,</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. uzasadni, że siła elektrodynamiczna jest skutkiem działania siły Lorentza na nośniki prądu;</li> <li>2. wyprowadzi wzór opisujący wartość siły elektrodynamicznej;</li> <li>3. wyznaczy kierunek i zwrot tej siły.</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>	-
<b>PRZEBIEG LEKCJI</b>	
<b>Faza wprowadzająca:</b>	
<p>Nauczyciel wykonuje prosty eksperyment (z huśtawką magnetyczną albo z szynami i ruchomą poprzeczką) i prosi uczniów o wyjaśnienie obserwowanego zjawiska.</p>	
<b>Faza realizacyjna:</b>	
<p>Nauczyciel, razem z uczniami, wyprowadza z wzoru opisującego siłę Lorentza wzór opisujący siłę elektrodynamiczną (według schematu z części „Warto przeczytać”): rozpoczyna nauczyciel, doprowadzając do zapisania wzoru (1), a dalsze działania wykonują wspólnie uczniowie, korzystając – w razie potrzeby – z jego podpowiedzi. Nauczyciel zwraca uwagę na to, że mamy do czynienia z iloczynem wektorowym. Pokazuje w praktyce (to może być na przykład rzeczywista huśtawka magnetyczna) wyznaczanie kierunku i zwrotu siły elektrodynamicznej według różnych sposobów i prosi, by każdy uczeń zapamiętał ten z nich, który dla niego jest najłatwiejszy. Następnie wyświetlona zostaje animacja dotycząca silnika liniowego, a nauczyciel prosi uczniów, aby odpowiedzieli na pytania aktywizujące zawarte w animacji.</p>	
<b>Faza podsumowująca:</b>	
<p>W fazie podsumowującej, w celu utrwalenia wiedzy, uczniowie rozwiązują zadania: 3, 4, 5, i 8 z zestawu ćwiczeń.</p>	
<b>Praca domowa:</b>	
<p>Uczniowie powtarzają i utrwalają wiedzę poprzez rozwiązanie w domu zadań z zestawu ćwiczeń: 1, 2, 6, 7.</p>	

<b>Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium</b>	Jeśli nauczyciel nie skorzystał z animacji podczas lekcji, uczniowie powinni samodzielnie zapoznać się z nią w domu i odpowiedzieć na pytania aktywizujące w niej zawarte.
---	--