

## Projekt **eFizyka**

Multimedialne środowisko nauczania fizyki dla szkół  
ponadgimnazjalnych.

# Zjawisko Halla

---

## Ćwiczenie wirtualne

**Marcin Zaremba**

**2014-06-30**

## Spis treści

1. Wprowadzenie .....	2
2. Teoria w zarysie .....	2
3. Wykonanie eksperymentu symulowanego .....	4
▪ CEL ĆWICZENIA.....	4
▪ WYKONANIE EXPERYMENTU .....	5
▪ ANALIZA WYNIKÓW.....	7

## 1. Wprowadzenie

Ćwiczenia wirtualne stanowią uzupełnienie teorii dostępnej w podręczniku do nauki fizyki. Są serią doświadczeń symulowanych, opartych często o prawdziwe dane pomiarowe, odzwierciedlające prawdziwe doświadczenia związane z danym zagadnieniem fizycznym, możliwe do realizacji w laboratorium. Mogą być traktowane, jako wstęp do wykonania samodzielnie przez uczniów takich ćwiczeń w rzeczywistości; być pomocnym narzędziem do samodzielnej nauki danego zagadnienia w domu po skończonej lekcji; być traktowane, jako załączek budowy samodzielnych rzeczywistych urządzeń; bądź w przypadku niemożliwości przeprowadzenia i wykonania rzeczywistych doświadczeń w czasie lekcji z powodów technicznych (czy to przez nauczyciela czy przez uczniów), stanowić zastępstwo dla takich eksperymentów.

Program został napisany w środowisku LabVIEW 2013 SP1 firmy National Instruments. Do prawidłowego jego działania potrzebny jest komputer z zainstalowanym systemem MS Windows w wersji 7 lub nowszej oraz LabVIEW Run-Time Engine 2013 (RTE) firmy National Instruments, który można pobrać za darmo ze strony internetowej NI lub strony projektu. RTE musi być zainstalowany tylko jednokrotnie i jest wspólny dla wszystkich aplikacji. (W przypadku starszych systemów niż Windows 7, mogą występować problemy z uruchomieniem aplikacji lub błędami wyświetlania. W takim przypadku prosimy o kontakt z projektantami. Dane kontaktowe można znaleźć na stronie projektu).

Instalacja oprogramowania pobranego ze strony projektu nie nastręcza trudności. Po uruchomieniu instalatora można wybrać miejsce instalacji (zaleca się zachowanie domyślnej lokalizacji). Po pomyślnym ukończeniu procesu instalacji, aplikacja powinna uruchomić się automatycznie lub można uruchomić ją za pomocą skrótu.

## 2. Teoria w zarysie

Na ładunek elektryczny poruszający się w polu magnetycznym  $B$  działa siła Lorentza określona jako:

$$\vec{F}_L = e \left( \vec{v}_d \times \vec{B} \right)$$

Gdzie:

$F_L$  – siła Lorentza

$e$  – ładunek nośników

$B$  – indukcja pola magnetycznego

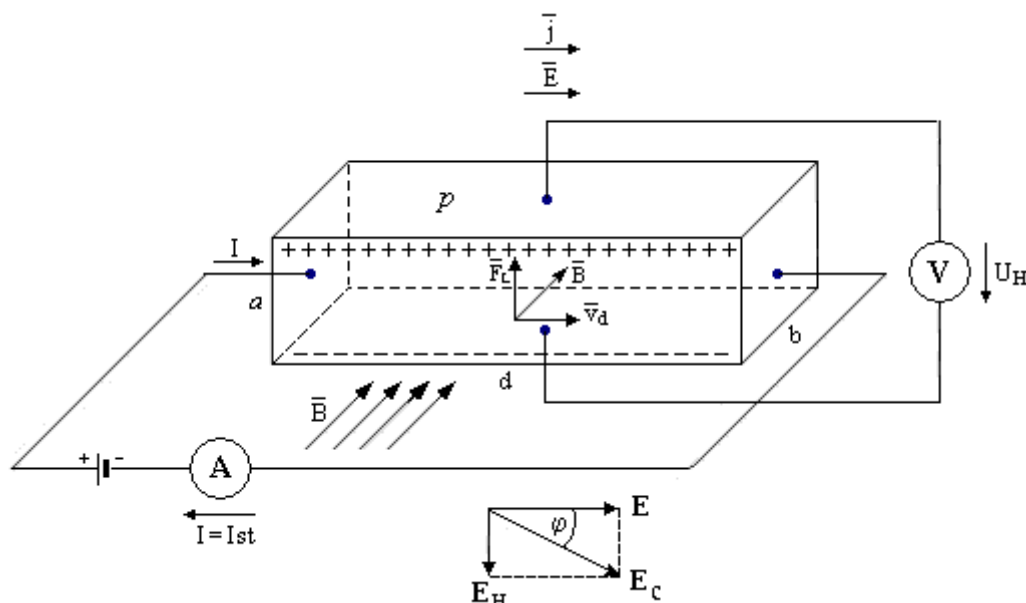
$v_d$  – prędkość dryfu nośników.

Wektor siły jest prostopadły do płaszczyzny wektorów w której leżą wektory  $v_d$  i  $B$  a jego kierunek wyznacza reguła siły prawoskrętnej. Takie oddziaływanie pozwala wyjaśnić zjawisko Halla. Przepływ prądu o natężeniu  $I$  wzdłuż cienkiej płytki umieszczonej w polu magnetycznym o indukcji  $B$  jest ruchem ładunków, na które to działa siła Lorentza. Odchyła ona te ładunki w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu prądu. W wyniku tego zjawiska ładunki zaczęły się gromadzić

bliżej przy jednej ze ścianek płytki, dopóki wytworzone pole elektryczne  $E_H$  (różnica w ładunku na ściankach płytki) nie zrównoważy działania siły Lorentza ( $F_L$ ).

$$e\vec{E}_H + \vec{F}_L = 0$$

Wynikiem nagromadzenia się ładunków po jednej ze stron jest wytworzenie się różnicy potencjałów nazywanej napięciem Halla ( $U_H$ ). Mechanizm powstawania  $U_H$  pokazany jest na rysunku 1. Dla uproszczenia obliczeń dobiera się tak kierunek pola magnetycznego, aby wektor indukcji magnetycznej  $B$  był skierowany pod kątem prostym do wektora prędkości, co upraszcza obliczenia zastępując iloczyn wektorowy, mnożeniem. (Inaczej mówiąc dobiera się tak układ doświadczalny i układ współrzędnych aby wektory  $B$  i  $E$  miały odpowiednio współrzędne:  $B=(0,B,0)$  i  $E=(E,0,0)$ ).



Rysunek 1. Powstawanie napięcia Halla pomiędzy dwoma ściankami płytki półprzewodnika umieszonego w polu magnetycznym o indukcji  $B$ .

Uwzględniając zależności na gęstość prądu i ruchliwość nośników:

$$j = env_d$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\mu = \frac{v_d}{E}$$

$$j = \frac{I}{ab}$$

gdzie:

$j$  – gęstość prądu

$n$  – koncentracja nośników

$\sigma$  – przewodnictwo

$E$  – natężenie pola elektrycznego

$\mu$  – ruchliwość nośników

$I$  – natężenie prądu

$a$  – szerokość hallotronu

$b$  – długość hallotronu

oraz dodatkowo że zgodnie z przyjętym układem współrzędnych

$$E_H = \frac{F_L}{e}$$

$$F_L = ev_d B$$

można wykazać że wartość napięcia Halla będzie wyrażona wzorem:

$$U_H = \frac{1}{en} \frac{IB}{b}$$

Zależność ta pokazuje, że wartość napięcia Halla jest proporcjonalna do natężenia prądu sterującego  $I$  (w doświadczeniu oznaczane jako  $I_s$ ) i do indukcji  $B$  oraz odwrotnie proporcjonalne do grubości płytki  $b$ , co łatwo sprawdzić doświadczalnie i będzie to celem tego ćwiczenia.

Współczynnikiem proporcjonalności jest:

$$R_H = \frac{1}{en}$$

Współczynnik ten nazywany jest stałą Halla. Na jej podstawie można wyznaczyć koncentrację nośników  $n$  oraz można także określić rodzaj nośników, bowiem zależy on od znaku  $R_H$ .

### 3. Wykonanie eksperymentu symulowanego

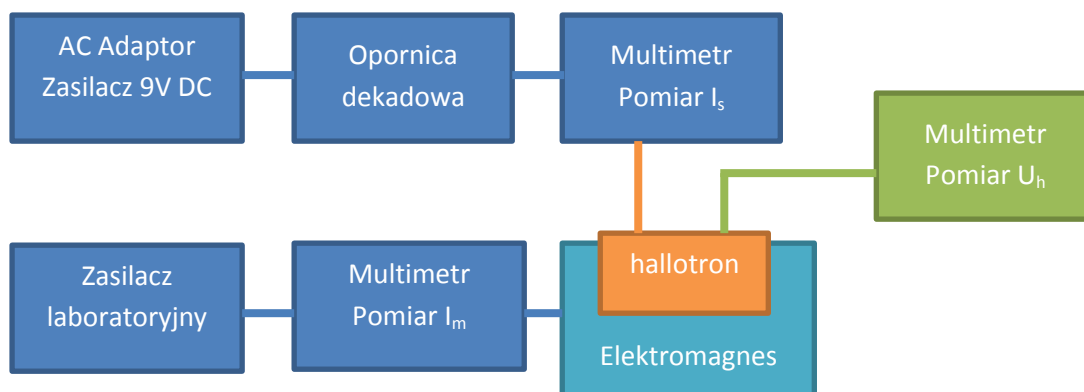
#### ■ CEL ĆWICZENIA

Celem doświadczenia jest:

- zarejestrowanie charakterystyk  $U_H(I_{st})$  przy prądzie elektromagnesu  $I_m = \text{const}$  co odpowiada stałej indukcji  $B$  oraz charakterystyki  $U_H(I_m)$  przy  $I_{st} = \text{const}$  i sprawdzenie zależności określającej wartość napięcia Halla (proporcjonalność napięcia Halla do wartości indukcji magnetycznej  $B$  i prądu sterującego  $I_{st}$ )
- wyznaczenie stałej Halla  $R_H$
- wyznaczenie koncentracji nośników  $n$ .

## ■ WYKONANIE EXPERYMENTU

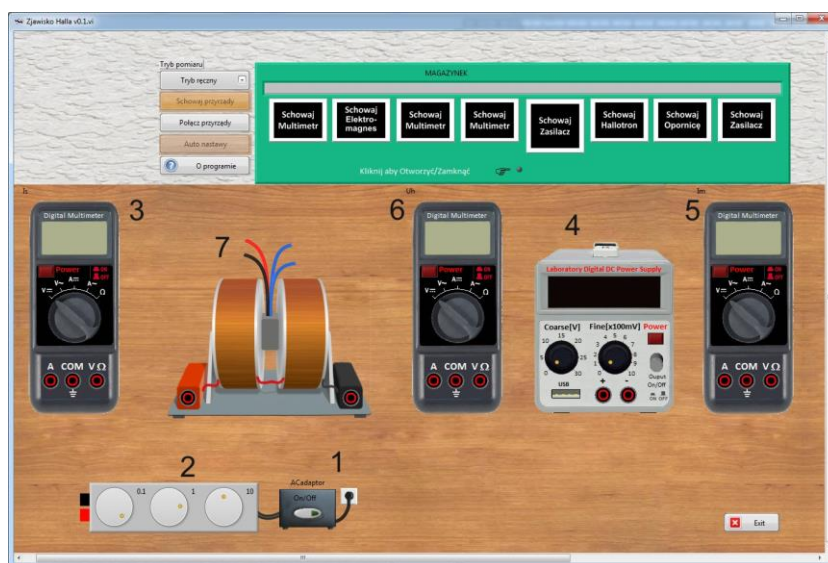
Schemat blokowy zestawu eksperymentalnego został przedstawiony na rysunku 2. W skład zestawu wchodzi:



Rysunek 2. Schemat blokowy zestawu eksperymentalnego.

- o zasilacz niskiego napięcia (9V DC) zasilającego obwód prądu sterowania hallotronu (1)
- o opornica dekadowa służąca do regulacji prądu sterowania, dobrana tak aby nie przekroczyć maksymalnego dopuszczalnego prądu sterowania hallotronu, który to w modelowanym zestawie wynosi 20mA (2)
- o multimetr uniwersalny mierzący prąd sterowania -  $I_s$  (3)
- o zasilacz laboratoryjny służący do zasilania elektromagnesu (4)
- o multimetr uniwersalny mierzący prąd płynący w cewce elektromagnesu –  $I_m$  (5)
- o multimetr uniwersalny mierzący napięcie Halla (6)
- o elektromagnes i hallotron umieszczony w nim tak, aby cały był możliwie w obszarze jednorodnego pola magnetycznego wytwarzanego przez elektromagnes (7).

Na rysunku 3 zaznaczono na panelu sterowania wirtualnego zestawu pomiarowego poszczególne elementy zestawu.



Rysunek 3. Poszczególne elementy zestawu doświadczalnego.

Przed przystąpieniem do doświadczenia podobnie jak w rzeczywistym eksperymencie należy przygotować aparaturę do pomiaru. W tym celu należy otworzyć magazynkę i następnie klikając w poszczególne przyrządy wyciągnąć je na panel przedni (rysunek 4). Można to zrobić ręcznie bądź skorzystać z trybu automatycznego.

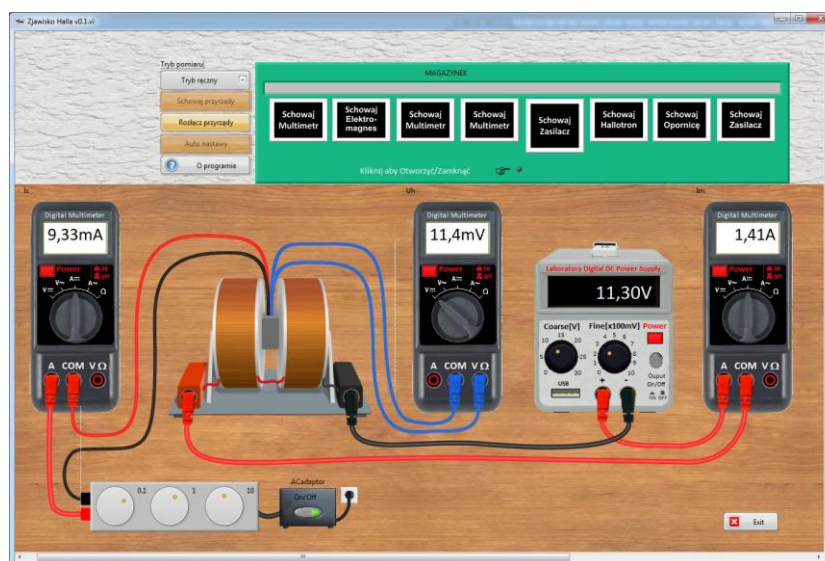


Rysunek 4. Przygotowanie zestawu pomiarowego.

Następnie połączyć przyrządy wciskając przycisk połącz przyrządy. W rzeczywistości trzeba zawsze pamiętać o prawidłowym podłączaniu woltomierza i amperomierza, aby nie spowodować ich uszkodzenia.

W kolejnym kroku należy włączyć przyrządy pomiarowe i zasilacze, ustawić multimetry mierzące prądy  $I_s$  oraz  $I_m$  w tryb pomiaru prądu stałego, a multimetr mierzący  $U_H$  w tryb pomiaru napięcia stałego (można wykonać to ręcznie bądź skorzystać z trybu automatycznego).

Zmieniając prąd sterowania oraz prąd elektromagnesu można obserwować pojawianie się oraz zmianę napięcia Halla w zależności od ustawionych wartości. W doświadczeniu przyjęto że wymiar  $b$  zastosowanego Hallotronu wynosi  $100\mu m$ . Jest to dosyć typowy rozmiar hallotronów stosowanych w rzeczywistych zestawach edukacyjnych. Potrzebny będzie on do obliczenia stałej Halla, a następnie koncentracji nośników w półprzewodniku z którego wykonany został hallotron. Na rysunku 5 przedstawiono kompletny i skonfigurowany zestaw pomiarowy.



Rysunek 5. Kompletny i skonfigurowany zestaw doświadczalny gotowy do pomiarów.

## Wykonanie pomiarów

- Ustawiamy stałą wartość prądu sterującego magnesem -  $I_m$  (np. 3A).
- Zmieniamy wartość prądu sterującego  $I_s$  poprzez zmianę wartości opornicy dekadowej i zapisujemy odczytane wartości napięcia Halla ( $U_H$ ).
- Ustawiamy stałą wartość prądu sterującego hallotronu  $-I_s$ .
- Zmieniamy wartość prądu  $I_m$  (czyli tym samym zmieniamy wartość indukcji  $B$ ) i zapisujemy odczytane wartości napięcia Halla ( $U_H$ ).

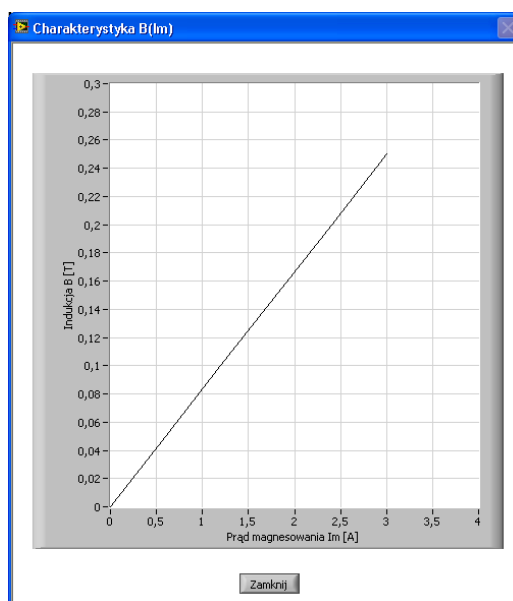
Mając zebrane tak dwie serie pomiarów, możemy zrealizować wszystkie cele doświadczenia wymienione na początku rozdziału.

### ANALIZA WYNIKÓW

Wykorzystując dane zebrane w dwóch seriach pomiarowych (punkty b i d) wykreślić należy charakterystykę  $U_H(I_{st})$  przy prądzie elektromagnesu  $I_m = \text{const}$  oraz charakterystykę  $U_H(I_m)$  przy  $I_{st} = \text{const}$ . (Zgodnie z teorią powinniśmy otrzymać linie proste przy założeniu że charakterystyka  $B(I_m)$  elektromagnesu jest liniowa). Rejestrację powyższych charakterystyk można powtórzyć przy innych wartościach  $I_m = \text{const}$  i  $I_s = \text{const}$ .

Patrząc na równanie określające napięcie Halla, wszystkie wartości w przypadku obydwu powyższych charakterystyk są stałe, a zawsze zmienia się tylko jeden parametr. W takim przypadku równania są równaniami prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych:  $y = ax$ . Za pomocą metody najmniejszych kwadratów możemy dopasować równanie prostej do punktów pomiarowych (wyznaczenie współczynnika  $a$ ), a następnie uwzględniając stałą  $b$  (wymiar Hallotronu) i jedną z ustalonych wartości  $I_m = \text{const}$  (stała wartość  $B$ ) lub  $I_{st} = \text{const}$  w zależności od wybranej charakterystyki, obliczyć stałą Halla.

W praktyce wykorzystuje się charakterystykę  $U_H(I_{st})$  przy prądzie elektromagnesu  $I_m = \text{const}$  (stała wartość indukcji  $B$ ), ponieważ trzeba tylko raz odczytać z charakterystyki  $B(I_m)$  wartość indukcji  $B$  dla danego prądu sterującego. Poniżej na rysunku 6, przedstawiona jest charakterystyka  $B(I_m)$  elektromagnesu.



Rysunek 6. Charakterystyka  $B(I_m)$  elektromagnesu wykorzystywanego w doświadczeniu.



Metodę najmniejszych kwadratów, czyli dopasowanie do prostej stosuje się dlatego, że w rzeczywistym eksperymencie wstępują błędy pomiarowe, a zatem punkty nie będą układać się idealnie wzdłuż prostej teoretycznej, co oznacza, że gdyby wyliczyć stałą Halla dla każdego z punktów pomiarowych, otrzymalibyśmy nieco inny wynik, a z kolei te wyniki trzeba by później uśredniać. Metoda ta uwzględnia rozrzut punktów ze względu na istnienie błędów pomiarowych i daje w wyniku tego uśrednioną wartość.

W najprostszym przypadku należy wyliczyć stałą Halla, ze wzoru dla jednego z punktów pomiarowych, odczytując wcześniej wartość indukcji  $B$  z podanej charakterystyki oraz uwzględnić że wymiar  $b$  Hallotronu wynosi  $100\mu\text{m}$ .

Znając stałą Halla oraz ładunek nośników (ładunek elektronu jest dobrze określoną stałą i można ją znaleźć w tablicach stałych fizycznych) możemy obliczyć koncentrację nośników  $n$  w półprzewodniku.