

## Badanie prawa Faraday'a

### CELE

Doświadczalne sprawdzenie słuszności prawa indukcji elektromagnetycznej.

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faraday'a jest badane w drodze obserwacji siły elektromotorycznej (SEM) indukowanej w cewce przez poruszający się ruchem drgającym magnes sztabkowy. W czasie eksperymentu badane są indukcja pola magnetycznego poruszającego się magnesu oraz zmiany w czasie siły elektromotorycznej wzbudzonej w cewce.

Analiza zależności wzbudzonej siły elektromotorycznej od szybkości zmian strumienia magnetycznego obejmującego cewkę posłuży do sprawdzenia poprawności prawa Faraday'a.

### SPIS TREŚCI

- I. Model teoretyczny
- II. Zestaw pomiarowy
- III. Przebieg doświadczenia
- IV. Analiza pomiarów (TI83)
- V. Analiza pomiarów (MS Excel)

### MODEL TEORETYCZNY

**Prawo Faraday'a** stanowi, że siła elektromotoryczna zaindukowana w obwodzie zamkniętym umieszczonym w polu magnetycznym jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego przenikającego przez obwód.

Siła elektromotoryczna jest wyrażona przez pochodną strumienia pola względem czasu (1.)

$$E = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

Znak minus w równaniu związany jest z kierunkiem zaindukowanego w obwodzie prądu elektrycznego. Kierunek ten określony jest przez regułę Lenza, która stanowi, że wzbudzony prąd ma taki kierunek, że jego pole magnetyczne przeciwstawia się przyczynie wywołującej siłę elektromotoryczną.

Zmiana strumienia pola magnetycznego może być wywołana zmianą jednego lub więcej jego parametrów (2).

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \angle(\vec{B}, \vec{S}) \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}(B \cdot S \cdot \cos \angle(\vec{B}, \vec{S})) \quad (3)$$

Tak więc SEM może zostać wzbudzona w wielu sytuacjach. Typowe przypadki to zmienne w czasie pole magnetyczne i względny ruch źródła pola magnetycznego i obwodu. Zjawisko wzbudzenia SEM wskutek ruchu obrotowego pętli przewodzącej w polu magnetycznym jest podstawą funkcjonowania generatorów napięcia.

Szczegółowa analiza siły elektromotorycznej indukcji powstającej w trakcie omawianego eksperymentu zamieszczona jest poniżej (9).

### Pole magnesu sztabkowego.

Rozkład linii indukcji pola magnetycznego w pobliżu magnesu sztabkowego jest zbliżony do rozkładu pola wywołanego przez cewkę z prądem - Porównaj rysunki 1 i 2.

W szczególności indukcja pola magnetycznego magnesu  $\vec{B}$  może być opisywana jako pole dipola magnetycznego charakteryzowanego przez magnetyczny moment dipolowy  $\vec{\mu}$ . Indukcja pola magnetycznego (gęstość strumienia) na osi magnesu, w próżni, w odległości  $y$  od jego środka jest wyrażona przez :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi y^3} \vec{\mu} = C \frac{1}{y^3} \quad (4)$$

Indukcja magnetyczna na osi cewki złożonej z  $N$  zwojów kołowych o promieniu  $r$  z prądem  $i$  jest wyrażona przez analogiczne równanie:

$$B_y = \frac{\mu_0 N i r^2}{2(y^2 + r^2)^{3/2}} \quad (5)$$

Definiując magnetyczny moment dipolowy cewki jako:

$$|\vec{\mu}| = N i \pi r^2 \quad (6)$$

Dla punktów położonych w dużej odległości od środka cewki, w których  $y \gg r$ , wyrażenie dla indukcji magnetycznej upraszcza się do:

$$\vec{B}_y = \frac{\mu_0 \vec{\mu}}{2\pi y^3} \quad (7)$$

tzn. jest podane w ten sam sposób jak w przypadku magnesu sztabkowego (4)

### Pole magnetyczne drgającego magnesu.

W wybranym punkcie indukcja magnetyczna od magnesu poruszającego się względem tego punktu zmienia się czasie stosownie do zmian odległości punktu od środka magnesu.

Rysunek 3 przedstawia sytuację występującą w naszym doświadczeniu

Zakładając, że:

$D$  - jest odległością pomiędzy środkiem cewki i położeniem spoczynkowym magnesu.

$A$  - jest amplitudą drgań magnesu

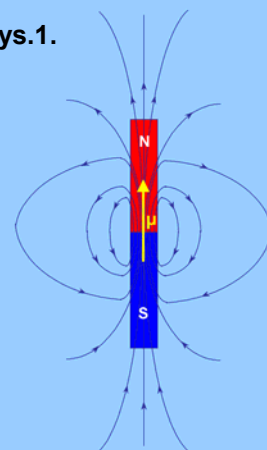
$\omega$  - jest częstością kołową drgań

$\varphi$  - jest fazą początkową drgań

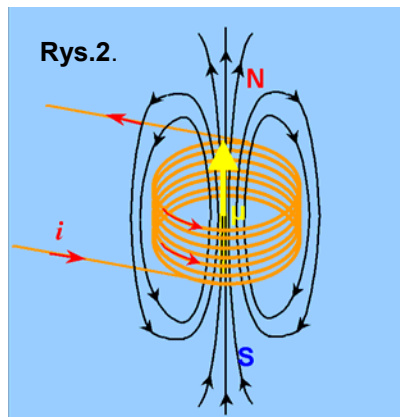
$y$  - odległość bieżącego położenia magnesu od cewki jest dana przez:

$$y = D + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

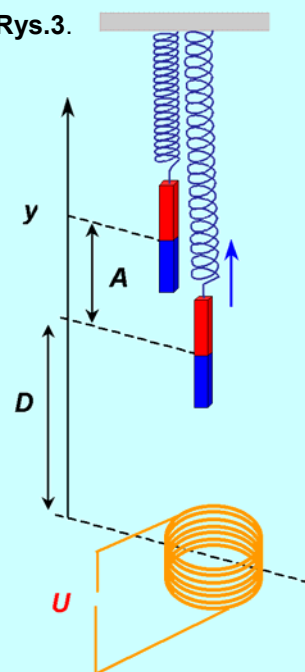
Rys.1.



Rys.2.



Rys.3.



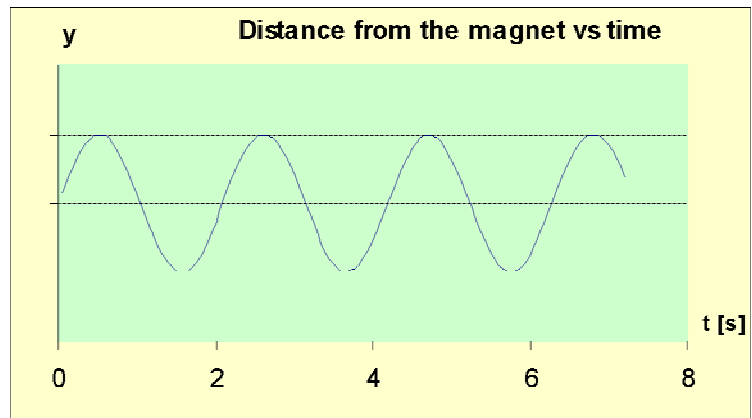
Rysunek 4 przedstawia zależność położenia magnesu od czasu

Pole magnetyczne w środku cewki wyrażone jest przez (porównaj z 4):

$$B_y(t) = C \frac{1}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (9)$$

Rysunek 5 przedstawia zależność indukcji od czasu.

**Rys.4.**

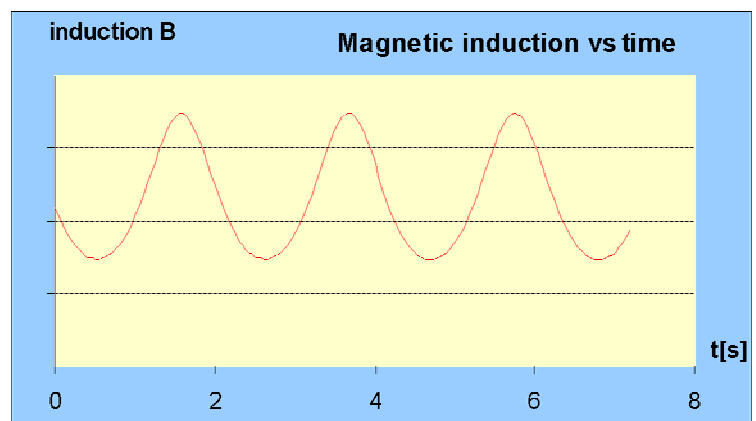


Szybkość zmian indukcji magnetycznej w obszarze cewki, w której źródłem jest drgający magnes może być otrzymana z równania 9 jako  $dB/dt$  w postaci:

$$\frac{dB}{dt} = C \frac{-3Aw \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (10)$$

Rysunek 6 przedstawia szybkość zmian indukcji  $dB/dt$ .

**Rys.5.**



Przyjmując, że orientacja i parametry geometryczne cewki nie zmieniają się, strumień indukcji pola magnetycznego przez cewkę opisywany jest przez:

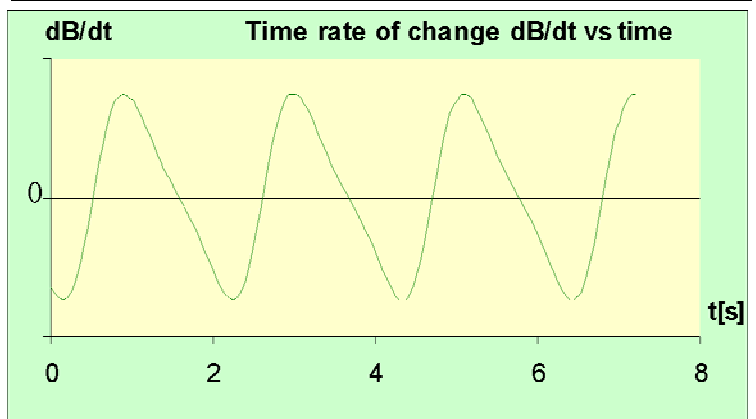
$$\Phi = NS \cdot C \frac{1}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^3} \quad (11)$$

gdzie:

**N** – jest liczbą zwojów cewki

**S** – jest polem przekroju poprzecznego pojedynczego zwoju cewki.

**Rys.6**



**Uwaga:**

Równanie 11 jest oparte na uproszczającym założeniu, że pole magnetyczne jest takie samo dla wszystkich zwojów cewki.

Wówczas szybkość zmian strumienia pola magnetycznego przenikającego przez cewkę jest wyrażona przez:

$$\frac{d\Phi}{dt} = NS \cdot C \frac{-3Aw \cos(\omega t + \varphi)}{(D + A \sin(\omega t + \varphi))^4} \quad (12)$$

a wykres  $\frac{d\Phi}{dt}$  w funkcji czasu jest analogiczny do przedstawionego na rysunku 6.

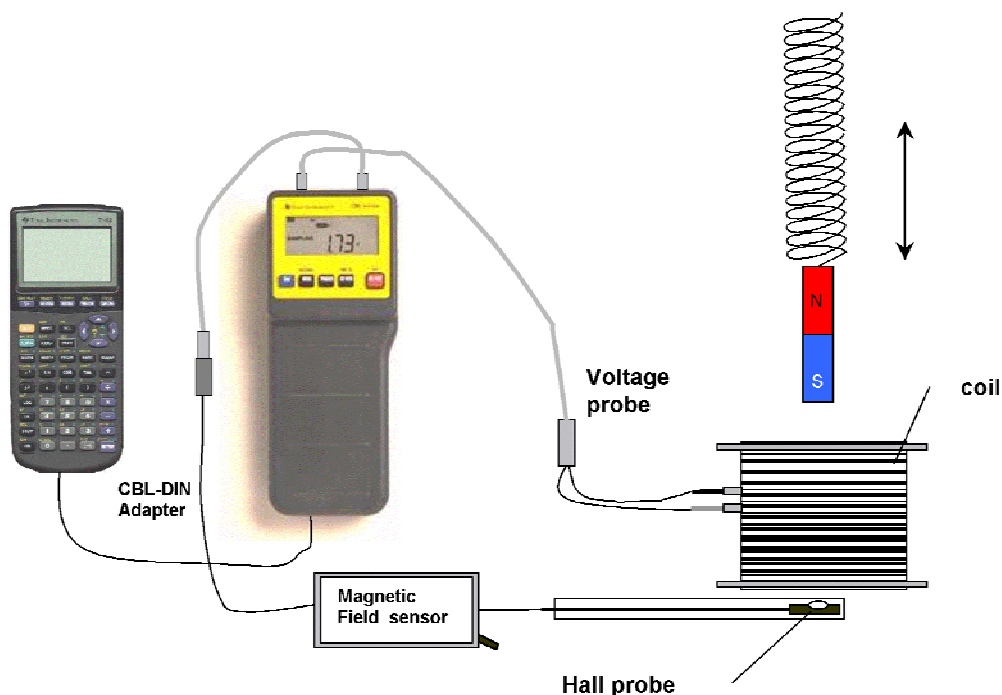
**ZESTAW POMIAROWY.**

:

Badanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej może zostać przeprowadzone w układzie zawierającym: (Rys.7):

- i. Cewkę np. 6500 zwojów, drut = 0.2mm, przekrój poprzeczny ok. 20 cm<sup>2</sup> , średnica cewki 5 cm
- ii. Magnes sztabkowy o długości ok.10 cm
- iii. Sprężynę o długości spoczynkowej ok.30 cm), tworzącej wraz z podwieszonym do niej magnesem oscylator o okresie ok. 1-3 sek
- iv. Statyw laboratoryjny (ok. 1 m wysokości)
- v. Stację pomiarową CBL lub CBL2  
<http://www.vernier.com/legacy/cbl/index.html>  
lub CBL2  
<http://education.ti.com/us/product/tech/datacollection/features/cbl2.html>
- vi. Czujnik pola magnetycznego dla stacji CBL™ (Vernier MG-DIN lub MG-BTA)  
<http://www.vernier.com/probes/mg.html>
- vii. przejściówkę CBL - DIN (potrzebne przy wersji MG-DIN )  
<http://www.vernier.com/probes/adapters.html>
- viii. Sondę napięciową (standard CBL) <http://www.vernier.com/probes/tl.html>
- ix. Kalkulator graficzny TI83, TI83 Plus, TI 84, TI89, TI92, TI92 Plus, TI Voyage 200
- x. Kabel połączeniowy (standard)
- xi. program Physics (wersja odpowiednia dla typu kalkulatora)  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/83plus/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/89/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92/>  
<ftp://ftp.ti.com/pub/graph-ti/cbl/programs/92plus/>
- xii. Kabel TI-GRAPH LINK™ (opcjonalnie)  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/cables.html#serialwin>  
wraz oprogramowaniem:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/downgraph.html>  
Komputer osobisty z oprogramowaniem TI Connect™ (opcjonalnie) - opis dostępny pod adresem:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html>  
program można pobrać pod adresem:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>

Rys.7.

**Uwagi praktyczne do zestawienia i wykonania eksperymentu.**

- Magnes zawieszony na sprężynie powinien swobodnie drgać w pionie, wzdłuż osi cewki.
- Magnes powinien być skierowany biegunem S w kierunku cewki.
- Minimalna odległość pomiędzy biegunem S magnesu i górną krawędzi cewki w czasie drgań powinna wynosić nie mniej niż 3 cm.
- Wartości pozostałych parametrów drgań powinny wynosić odpowiednio: amplituda 10 - 15 cm, okres 1-3 sec.
- Czujnik pola magnetycznego powinien być trwale zamocowany poniżej cewki (np. przy pomocy taśmy klejącej), przy czym biały znacznik czujnika powinien znajdować się na osi cewki i być skierowany do góry (tj. zwrócony w kierunku bieguna S magnesu).
- Przełącznik zakresu czujnika pola magnetycznego powinien być ustawiony w położeniu niskiej czułości - "Low".
- Czujnik pola magnetycznego powinien być podłączony poprzez adapter CBL-DIN do wejścia CH1 urządzenia CBL.
- Sonda napięciowa powinna być podłączona do wejścia CH2 urządzenia CBL.

### PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA (opis dla kalkulatora TI 83/84)

W trakcie eksperymentu rejestrowane są: indukcja pola magnetycznego wytworzonego przez magnes sztabkowy oraz wartości siły elektromotorycznej (napięcia) wzbudzonej w cewce w rezultacie zmian strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez uzwojenia. Obie wielkości mierzone są równocześnie w funkcji czasu.

Pomiar obu wielkości odbywa się pod kontrolą programu Physics załadowanego i uruchomionego na kalkulatorze graficznym.

Procedura pomiarowa podzielona jest na etap przygotowania oraz pomiar właściwy.

#### **Przygotowanie pomiaru:**

Na kalkulatorze uruchamiany jest program Physics przez wskazanie jego nazwy z listy programów [PRGM] lub z menu aplikacji [APPS] (TI83 Plus).

Po uruchomieniu programu, w menu głównym wybieramy opcję 1:SET UP PROBES (Rys.8.) a następnie wskazujemy liczbę czujników 2:TWO (Rys. 9). W kolejnych krokach wybieramy sondę pola magnetycznego 2:MAGNETIC FIELD oraz napięcia 3:VOLTAGE (Rys. 10).

```
***MAIN MENU***
1:SET UP PROBES
2:COLLECT DATA
3:ANALYZE
4:TRIGGERING
5:ZERO PROBES
6:RETRIEVE DATA
7:QUIT
```

Rys.8

```
NUMBER OF PROBES
1:ONE
2:TWO
3:THREE
```

Rys.9

```
SELECT PROBE
1:LIGHT
2:MAGNETIC FIELD
3:VOLTAGE
4:C-V CURRENT
5:C-V VOLTAGE
6:THERMOCOUPLE
7:MORE
```

Rys.10

Pomiar właściwy powinien być poprzedzony kalibracją czujników (pola magnetycznego i napięcia). W omawianym eksperymencie, który polega na obserwacjach o charakterze jakościowym, można wykorzystać domyślne, standardowe nastawy kalibracyjne. W związku z tym wybieramy opcję 1: USE STORED (Rys. 11.) oraz 4: LOW (MTESLA) (Rys.12) . Obie sondy powinny zostać wyzerowane pod nieobecność źródeł pól magnetycznych. Takie postępowanie pozwala także na wyeliminowanie wpływu ziemskiego pola magnetycznego na obserwacje.

Po usunięciu magnesu sztabkowego wybieramy opcję 5: ZERO PROBES (Rys. 13.) a następnie 5: ALL CHANNELS (Rys.14). Kiedy wartości wyświetlane na ekranie interfejsu CBL ustabilizują się naciskamy czarny klawisz TRIGGER pod ekranem CBL.

```
***CALIBRATION***
1:USE STORED
2:PERFORM NEW
3:MANUAL ENTRY
```

Rys.11

```
MG FIELD SETTING
1:HIGH(GAUSS)
2:HIGH(MTESLA)
3:LOW(GAUSS)
4:LOW(MTESLA)
```

Rys.12

```
***MAIN MENU***
1:SET UP PROBES
2:COLLECT DATA
3:ANALYZE
4:TRIGGERING
5:ZERO PROBES
6:RETRIEVE DATA
7:QUIT
```

Rys.13

Opisana procedura kalibracji i zerowania powinna być wykonana jednorazowo, na początku doświadczenia.

### Wybór parametrów pomiaru.

Z głównego menu programu Physics należy wybrać opcję 2:COLLECT DATA (Rys. 8) oraz 2:TIME GRAPH (Rys. 15). Pozwoli to na dokonanie pomiarów w funkcji czasu. W dalszej kolejności należy podać czas próbkowania (sampling time) np. 0.04 sek oraz liczbę próbek (np.50) (Rys. 16). Przed uruchomieniem pomiaru (Rys. 17) należy sprawdzić ustawienie elementów zestawu i wprawić magnes sztabkowy w ruch drgający (w pionie) - patrz Uwagi praktyczne

```

SELECT CHANNEL
1:CHANNEL 1
2:CHANNEL 2
3:CHANNEL 3
4:MOTION
5:ALL CHANNELS
6:RETURN TO MAIN
    
```

Rys.14

```

DATA COLLECTION
1:MONITOR INPUT
2:TIME GRAPH
3:TRIGGER/PROMPT
4:TRIGGER
5:RETURN TO MAIN
    
```

Rys.15

```

ENTER TIME
BETWEEN SAMPLES
IN SECONDS:.04

ENTER NUMBER
OF SAMPLES:50
    
```

Rys.16

Rozpoczęcie pomiaru dokonuje się po naciśnięciu klawisza [ENTER] na kalkulatorze, po czym pomiary realizowane są automatycznie. Po zebraniu nakazanej liczby próbek pomiar kończy się automatycznie o czym informuje tekst wyświetlany na ekranie kalkulatora. (Rys. 18).

Wartości czasu zachowane są w liście L1, indukcja pola magnetycznego w liście L2 a wartości indukowanej w cewce SEM (napięcia) w liście L3.

```

READY EQUIPMENT.
PRESS [ENTER] TO
BEGIN COLLECTING
DATA.
    
```

Rys.17

```

TIME IN L1
CHANNEL 1 IN L2
CHANNEL 2 IN L3

[ENTER]
    
```

Rys.18.

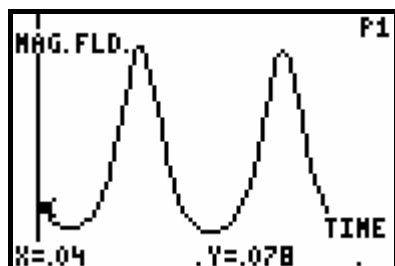
```

SELECT GRAPH
1:CHANNEL 1
2:CHANNEL 2
3:NEXT
    
```

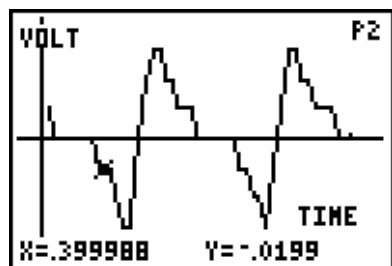
Rys.19.

Wykres zależności indukcji pola od czasu można uzyskać wybierając z menu (Rys. 19) 1: CHANNEL 1 - (Rys. 20) a wykres napięcia (SEM) wybierając 2:CHANNEL 2 (Rys. 21).

Jeśli z jakiegoś powodu uzyskane wyniki nie są zadowalające to możliwe jest niekłopotliwe powtórzenie pomiaru przy tych samych lub nowych wartościach parametrów (ponowna kalibracja sond nie jest konieczna) (Rys. 22).



Rys.20



Rys.21

```

**REPEAT?**
1:NO
2:YES
    
```

Rys.22

Dalsza analiza uzyskanych danych może zostać wykonana poza programem Physics, po jego zamknięciu.

### ANALIZA POMIARÓW (dla kalkulatora TI83)

Pogłębiona analiza eksperymentu może zostać dokonana w kategoriach prawa indukcji elektromagnetycznej Faraday'a przy wykorzystaniu narzędzi dostępnych w kalkulatorach graficznych (lub oprogramowania do analizy danych takich jak arkusz kalkulacyjny MS Excel).

Uzyskane w pomiarach dane zachowane są w kalkulatorze w postaci list:

- czas w sekundach w liście - L1
- indukcja magnetyczna w mTesla'ch w liście - L2
- napięcie (SEM) w Voltach w liście - L3

Przykładowe dane są dostępne w postaci plików w formacie TI83:

- wartości czasu w sekundach w pliku; - Data sample/TI83/L1
- wartości indukcji w pliku - Data sample/TI83/L2
- wartości siły elektromotorycznej w pliku - Data sample/TI83/L3

### Analiza wykresów

Strumień pola magnetycznego przenikający przez cewkę jest proporcjonalny do mierzonej indukcji magnetycznej (patrz model teoretyczny). Strumień ten zmienia się w czasie ponieważ źródło pola (magnes) wykonuje ruch względem cewki.

W rezultacie ruchu magnesu zaindukowana w cewce siła elektromotoryczna (SEM) jest mierzona w postaci napięcia. Zależność strumienia od czasu oraz zależność zaindukowanego napięcia od indukcji może być analizowana graficznie.

### Indukcja pola magnetycznego oraz siła elektromotoryczna indukcji jako funkcje czasu.

Definiując wykres Plot1 jako L2 vs. L1 otrzymamy wykres zależności  **$B(t)$**  zaś definiując wykres Plot2 jako L3 vs. L1 otrzymamy wykres zależności  **$SEM(t)$**  (Rys.23).

Po dopasowaniu rozmiarów okna wykresu możliwa jest obserwacja obu zależności jednocześnie (Rys.24).

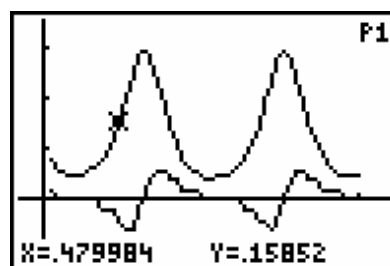
Zależność indukcji magnetycznej od czasu (Plot1) odpowiada ruchowi harmonicznemu magnesu. Wykres SEM (Plot2) cechuje się podobnym (z przesunięciem fazowym) charakterem zależności.

Zmiana nachylenia krzywej  **$B(t)$**  decyduje o kształcie zależności  **$SEM(t)$**  plot. Obserwowana zmiana znaku odpowiada charakterowi zmian pola magnetycznego i może być objaśniana w oparciu o regułę Lenza.

Porównanie z modelem teoretycznym (Rys 5 i 6) pokazuje, że zależności uzyskane w drodze eksperymentu odpowiadają przewidywaniom modelu. Działanie reguły Lenza można sprawdzić dopiero po szczegółowej analizie kierunku uzwojeń cewki i biegunowości podłączenia sondy napięcia.



Rys.23.



Rys.24.



### Sprawdzenie prawa Faraday'a

Uzyskane dane eksperymentalne umożliwiają badanie prawa Faraday'a przez sprawdzenie liniowego charakteru zależności zaindukowanej SEM od szybkości zmian strumienia pola magnetycznego. Analiza wymaga porównania napięcia z pochodną czasową pola magnetycznego rejestrowanego przez czujnik pola.

Proponowana procedura numerycznego wyznaczenia pochodnych, podana jest za G. Adie [w 'Using the TI89 in Physics' Bk Techware, 2000].

Obliczenia oparte są na wyznaczeniu ilorazów różnicowych oryginalnych wartości pola magnetycznego i czasu.

Kolejność postępowania jest następująca:

1. zdefiniowanie nowej listy L5 zawierającej ilorazy różnicowe kolejnych wartości z listy L2 dla stałego przyrostu wartości czasu (np. 0.04 sec)
2. zdefiniowanie nowych list L4 i L6 zawierających odpowiednio wartości czasu i napięcia. Liczebność tych list jest zredukowana o 1 stosownie do wymuszonego poprzednią operacją zmniejszenia o 1 liczebności listy L5.

Procedura korzysta z dwóch funkcji  $\Delta\text{List}()$  i  $\text{cumSum}()$  wywoływanych z menu STAT OPS ; Rys. 25. Składnię poleceń przedstawia Rys.26

W rezultacie otrzymujemy trzy nowe listy. Zawierają one odpowiednio:

- zmodyfikowane wartości czasu - lista L4,
- pochodne czasowe indukcji magnetycznej - lista L5
- zmodyfikowane wartości indukowanej SEM (napięcia) - lista L6

Badanie prawa Faraday'a wymaga utworzenia nowego wykresu (Plot3) przedstawiającego zależności indukowanej SEM od pochodnej czasowej (szybkości zmian) indukcji magnetycznej (strumienia) (L5 vs. L6) (Rys. 27).

```
NAMES OPS MATH
1:SortA(
2:SortD(
3:dim(
4:Fill(
5:seq(
6:cumSum(
7:ΔList(
```

Rys.25.

```
ΔList(L2)/.04→L5
(-.38065 -.1790...
L1(1)+cumSum(ΔLi
st(L1))→L4
(.0799936 .1199...
L3(1)+cumSum(ΔLi
st(L3))→L6
```

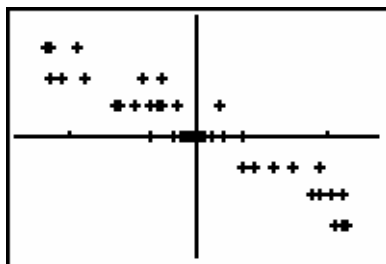
Rys.26.

```
STAT PLOTS
1:Plot1...Off
  [ ] L1 L2
2:Plot2...Off
  [ ] L1 L3
3:Plot3...On
  [ ] L5 L6 +
4:PlotsOff
```

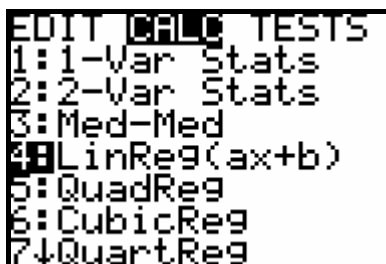
Rys.27.

Na podstawie uzyskanego wykresu (Rys.28) można sformułować hipotezę o liniowym charakterze zależności pomiędzy przedstawianymi wielkościami. Ten liniowy charakter może zostać potwierdzony przez dopasowanie (regresję) odpowiedniej funkcji liniowej  $\text{LinReg}(ax+b)$  dla list L5 oraz L6 (z menu STAT CALC - Rys. 29. i Rys. 30).

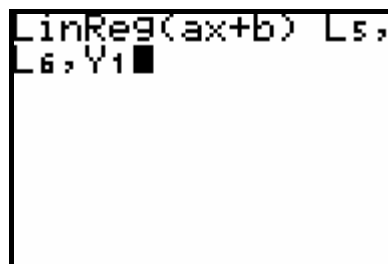
Naniesienie na wykres uzyskanej linii regresji (Rys. 31) pozwala na jej porównanie z rozkładem punktów pomiarowych Rys. 32.



Rys.28.

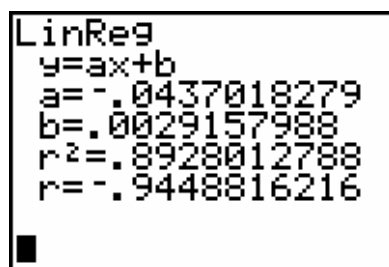


Rys.29.

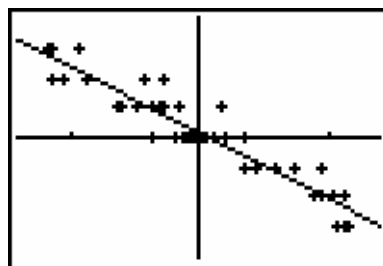


Rys.30.

Nachylenie linii reprezentuje parametry cewki i może być porównane z modelem teoretycznym (porównaj równanie 12.).



Rys.31.



Rys.32.

#### Wniosek:

Liniowy charakter obserwowanej zależności  $U(dB/dt)$  zgodny jest z modelem i potwierdza prawo indukcji elektromagnetycznej.

#### Rozszerzenie analizy:

Możliwe jest również utworzenie wykresów zależności napięcia od czasu (listy L4, L6) i pochodnej indukcji od czasu  $dB/dt$  (listy L4, L5). Porównanie tak powstałych wykresów wykaże zgodność obu zależności.

#### **Uwaga:**

Wyznaczone nachylenie zależności liniowej może mieć wartość dodatnią zamiast spodziewanej ujemnej. Przyczyna tej rozbieżności leży w odwrotnej polaryzacji podłączenia sondy napięciowej do cewki w trakcie pomiarów. Nie przeszkadza to jednak w przeprowadzeniu analizy poprawności prawa Faraday'a (za wyjątkiem dyskusji reguły Lenza).

### **ANALIZA POMIARÓW (z wykorzystaniem funkcji arkusza kalkulacyjnego MS EXCEL)**

Pogłębiona analiza eksperymentu może zostać dokonana w kategoriach prawa indukcji elektromagnetycznej Faraday'a przy wykorzystaniu narzędzi zaimplementowanych w kalkulatorach graficznych lub oferowanych przez oprogramowanie, np. MS Excel, komputerów osobistych.

#### **Przeniesienie danych z kalkulatora do komputera.**

Uzyskane dane mogą zostać, po zakończeniu pomiaru, przeniesione z kalkulatora do komputera. Kabel TI GRAPH LINK™ wraz z oprogramowaniem TI Connect™ umożliwia dostęp do zawartości pamięci kalkulatora (TI DEVICE EXPLORER) oraz edycję danych (TI DATA EDITOR).

Dane zgromadzone w czasie omawianego eksperymentu są zachowane w kalkulatorze w formie list:

- czas w sekundach w liście - L1
- indukcja magnetyczna w mTesla'ch w liście - L2
- napięcie (SEM) w Voltach w liście - L3

Przykładowe dane są dostępne w postaci plików w formacie TI83:

W ramach programu TI Connect™ - narzędzie TI DEVICE EXPLORER umożliwia zapisanie na dysku komputera listy zachowanej w kalkulatorze a następnie jej edycję w edytorze danych TI DATA EDITOR. Tryb eksportu - **Special Lists Export** umożliwia także zapisanie wskazanej listy w pliku o formacie Excel (plik \*.CSV ). Taki plik może być otwierany i przetwarzany przez program MS Excel.

Przykładowe dane w postaci plików MS Excel można pobrać z katalogów:

- czas w sekundach w pliku - Data sample/MSEExcel /time
- indukcja magnetyczna w mTesla'ch w pliku - Data sample/MSEExcel/magnetic induction
- napięcie (SEM) w Voltach w pliku - Data sample/MSEExcel/voltage

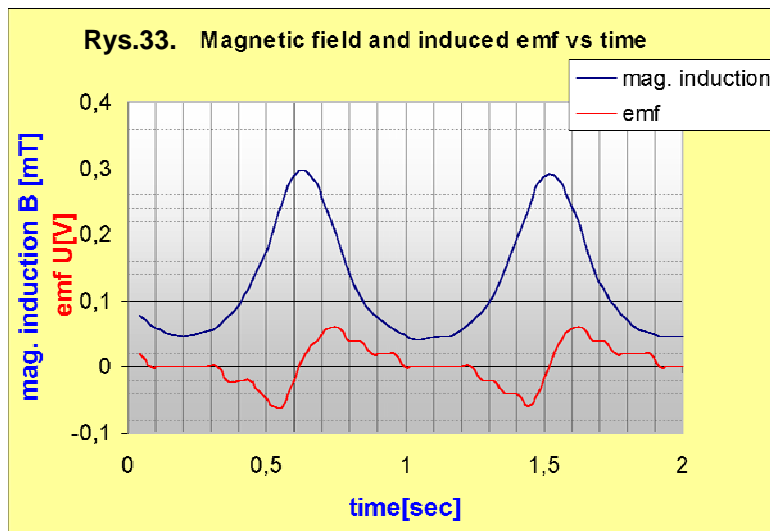
#### **Analiza wykresów**

Strumień pola magnetycznego przenikający przez cewkę jest proporcjonalny do mierzonej indukcji magnetycznej. Strumień ten zmienia się w czasie ponieważ źródło pola (magnes) wykonuje ruch względem cewki.

W rezultacie ruchu magnesu zaindukowana w cewce siła elektromotoryczna (SEM) jest mierzona w postaci napięcia. Zależność strumienia od czasu oraz zależność zaindukowanego napięcia od indukcji może być analizowana graficznie.

#### **Indukcja pola magnetycznego (i odpowiednio strumień) oraz siła elektromotoryczna indukcji jako funkcje czasu**

Rys. 33. przedstawia oba wykresy  **$B(t)$**  i  **$SEM(t)$** . Zależność indukcji magnetycznej od czasu odpowiada ruchowi harmonicznemu magnesu. Wykres SEM cechuje się podobnym (z przesunięciem fazowym) charakterem zależności. Zmiana nachylenia krzywej  **$B(t)$**  decyduje o kształcie zależności  **$SEM(t)$** . Obserwowana zmiana znaku odpowiada charakterowi zmian pola magnetycznego i może być objaśniana w oparciu o regułę Lenza. Porównanie z modelem teoretycznym (patrz – Rys.5 i Rys. 6) pokazuje, że zależności uzyskane w drodze



eksperymentu odpowiadają przewidywaniom modelu.

### Sprawdzenie prawa Faraday'a

Uzyskane dane eksperymentalne umożliwiają badanie prawa Faraday'a przez sprawdzenie liniowego charakteru zależności zaindukowanej SEM od szybkości zmian strumienia pola magnetycznego. Analiza wymaga porównania napięcia z pochodną czasową pola magnetycznego rejestrowanego przez czujnik pola.

Proponowana procedura numerycznego wyznaczenia pochodnych oparta jest na wyznaczeniu ilorazów różnicowych oryginalnych wartości pola magnetycznego i czasu.

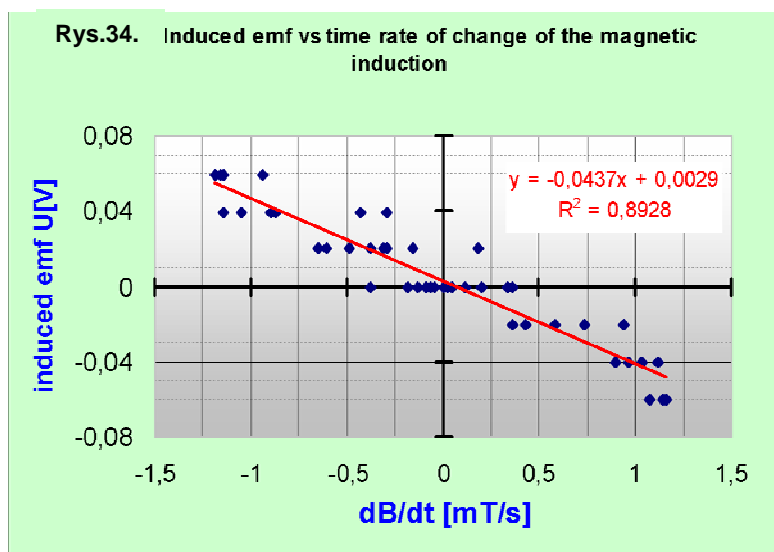
W rezultacie tej operacji otrzymujemy zestaw trzech kolumn zmodyfikowanych danych.

Zawierają one:

- zmodyfikowany zestaw czasów - kolumna time1 - dostępny jako samodzielny plik Data sample/MS Excel/**time1** )
- pochodne indukcji - kolumna dB/dt - dostępny jako samodzielny plik Data sample/MS Excel/ **time derivative**
- zmodyfikowany zestaw wartości SEM (napięcia) - kolumna emf1 – dostępny jako plik Data sample/MS Excel/ **voltage1**

Badanie prawa Faraday'a wymaga utworzenia nowego wykresu przedstawiającego zależność zaindukowanej siły elektromotorycznej od pochodnej indukcji pola magnetycznego Rys. 34.

Na podstawie uzyskanego wykresu można sformułować hipotezę o liniowym charakterze zależności pomiędzy przedstawianymi wielkościami. Ten liniowy charakter może zostać potwierdzony przez dopasowanie (regresję) i naniesienie na wykres odpowiedniej funkcji liniowej. Nachylenie linii reprezentuje parametry cewki i może być porównane z modelem teoretycznym. (patrz r.12).



### Wniosek:

Liniowy charakter obserwowanej zależności  $U(\text{dB/dt})$  zgodny jest z modelem i potwierdza prawo indukcji elektromagnetycznej.

### Rozszerzenie analizy:

Możliwe jest również utworzenie wykresów zależności napięcia od czasu i pochodnej indukcji od czasu  $\text{dB/dt}$ . Porównanie tak powstałych wykresów wykaże zgodność obu zależności.

### **Uwaga:**

Wyznaczone nachylenie zależności liniowej może mieć wartość dodatnią zamiast spodziewanej ujemnej. Przyczyna tej rozbieżności leży w odwrotnej polaryzacji podłączenia sondy napięciowej do cewki w trakcie pomiarów. Nie przeszkadza to jednak w przeprowadzeniu analizy poprawności prawa Faraday'a (za wyjątkiem dyskusji reguły Lenza).