



XI OLIMPIADA FIZYCZNA

(1961/1962)

ZAWODY III STOPNIA

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Zadanie doświadczalne – D

Nazwa – Wyznaczanie indukcji i przenikalności magnetycznej rdzenia elektromagnesu od natężenia prądu w zwojnicy.

Źródła – Komitet Główny Olimpiady Fizycznej

– Czesław Ścisłowski¹, *Fizyka w Szkole* nr 4, 1962, s. 47–53

– Piotr Halfter², *Olimpiady Fizyczne XI i XII*, PZWS, Warszawa 1966, s. 76–82

– T.M. Molenda, IF US, www.OF.szc.pl.

Masz do dyspozycji: źródło prądu, wyłącznik, opornik, amperomierz, przewody, elektromagnes z rdzeniem ze stali miękkiej, dynamometr³, linijkę.

Korzystając z podanych pomocy naukowych wyznacz zależność indukcji magnetycznej rdzenia elektromagnesu oraz jego przenikalności magnetycznej od natężenia prądu płynącego w zwojnicy. Wyniki przedstaw graficznie.

Siła udźwigu elektromagnesu podana jest w gramach – siły⁴ wyraża się w zależności od indukcji magnetycznej B i pola przekroju S następującą zależnością:

$$F = 4,06 B^2 S \cdot 10^{-5} \text{ (}^5\text{)}, \quad S \text{ – wyrażone w cm}^2.$$

Natężenie H pola magnetycznego wewnątrz zwojnicy wyraża się wzorem

$$H = \frac{0,4\pi n I}{l}, \quad H \text{ – wyrażone w Oe (ersted) (}^6\text{)};$$

gdzie n – liczba zwojów, l – długość zwojnicy.

¹ Dr Czesław Ścisłowski pełnił funkcję Kierownika Olimpiady Fizycznej od VIII OF do XVII OF, w tym okresie był autorem artykułów w *Fizyce w Szkole* z OF, książki *Olimpiady Fizyczne XVII i XVIII* (przyp. red.).

² Piotr Halfter był członkiem KGOF od I OF do XXIV OF (przyp. red.).

³ Dynamometr, obecnie – siłomierz; nazwa pochodzi od jednostki siły „dyna” w układzie CGS (centymetr, gram, sekunda) (przyp. red.).

⁴ gram siły, ozn. G – symbol jednostki siły w tzw. układzie ciężarowym, jednostka podstawowa – 1 kG (kilogram siła), siła przyciągania przez Ziemię masy 1 kg w miejscu, gdzie $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ (przyp. red.).

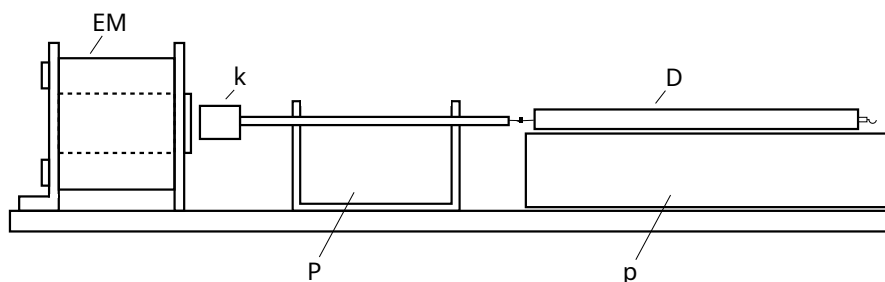
⁵ Współczynnik liczbowy $4,06 \cdot 10^{-5}$ we wzorze jest związany z przyjętymi w zadaniu i ówczynie stosowanymi jednostkami, oprócz już przytoczonych, jednostką B jest gauss ozn. Gs (układ CGS): $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$; w układzie SI wzór ten jest postaci: $F = B^2 S / (2\mu_0)$ (przyp. red.).

⁶ Współczynnik proporcjonalności $0,4\pi$ we wzorze jest związany z ówczynie stosowanymi jednostkami: H – Oe (ersted), I – A (amper), l – cm; w układzie jednostek SI współczynnik proporcjonalności we wzorze wynosi 1, tj. $H = nI/l$ (w obu przypadkach przy założeniu, że zwojnica jest długa w stosunku do jej średnicy); w układzie CGS jednostka natężenia pola magnetycznego $1 \text{ Oe} = 10^3 / (4\pi) \text{ A/m}$ i jednostka indukcji pola magnetycznego 1 Gs są sobie równe, choć mają oddzielne nazwy – $1 \text{ Oe} = 1 \text{ Gs}$ (przyp. red.).

Rozwiązanie zadania D – XI OF, III stopień, część doświadczalna

Dla przeprowadzenia odpowiednich pomiarów zawodnik dysponował aparaturą składającą się z elektromagnesu EM z rdzeniem o przekroju S oraz liczbie zwojów n , kotwiczki k z prętem mogącym przesuwać się w prowadnicy p ; podpórki P. Całość zmontowana była na deseczce (rys. 1).

Po włączeniu prądu do elektromagnesu kotwiczka k została przyciągnięta do rdzenia elektromagnesu. Na końcu pręta kotwiczki zaczepiono siłomierz D i ciągnięto po podstawce P, aż do oderwania kotwiczki. Odczytywano przy tym wskazania siłomierzu. Dla tego samego natężenia prądu płynącego przez elektromagnes wykonywano kilka pomiarów, biorąc średnią wartość siły F potrzebnej do oderwania kotwiczki.



Rys. 1 ⁽⁷⁾

Podczas magnesowania rdzenia z miękkiej stali powstaje w nim silne pole magnetyczne. Wektor natężenia tego pola wewnątrz żelaza H' dodaje się do pierwotnego natężenia H pola magnetycznego towarzyszącego prądowi płynącemu w uzwojeniu. Suma wektorowa obu tych natężeń

$$H' + H = B \quad (1)$$

nosi nazwę wektora indukcji magnetycznej.

Indukcja magnetyczna B w żelazie jest wielokrotnie większa niż natężenie pola magnetycznego H . Liczba wskazująca ile razy indukcja magnetyczna wewnątrz namagnesowanej substancji jest większa od natężenia pola magnesującego nazywa się przenikalnością magnetyczną danej substancji; oznacza się ją literą μ . Tak więc

$$B = \mu H \quad (= \mu_r \mu_0 H) \quad (8).$$

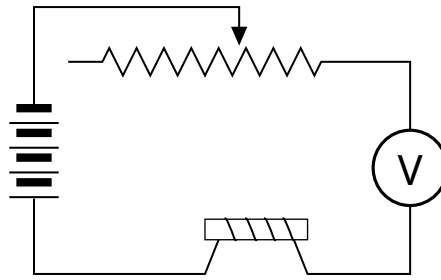
Przenikalność magnetyczna substancji zależy od struktury wewnętrznej tej substancji. Celem wyznaczenia indukcji magnetycznej rdzenia elektromagnesu trzeba wywołać w nim pole magnetyczne. Osiągamy to włączając uzwojenie elektromagnesu w obwód prądu elektrycznego w sposób przedstawiony na schemacie (rys. 2).

Natężenie pola magnetycznego towarzyszącego prądowi wewnątrz zwojnicy (bez rdzenia) obliczamy posługując się wzorem (2).

Liczba zwojów jest podana na osłonie zwojnicy, długość l zwojnicy i natężenie prądu trzeba zmierzyć. Z przytoczonego wzoru wynika, że H jest funkcją I . Należy wobec tego dokonać obliczeń H dla różnych wartości I . Zmiana wartości H wywołuje zmianę B a zatem i zmianę siły udźwigu elektromagnesu co wynika z wzoru (1).

⁷ Rys. ten i następne zostały wykonane bazując na rys. zamieszczonych w książce *Fizyka w Szkole* oraz *Olimpiady Fizyczne XI i XII* (przyp. red.).

⁸ W układzie CGS przenikalność magnetyczna μ jest bezwymiarowa – patrz przyp. 6 – i ilościowo równa względnej przenikalności magnetycznej μ_r – wzór w nawiasie, tj. $\mu = \mu_r$. (przyp. red.).



Rys. 2

Zadanie polega na wyznaczeniu zależności indukcji magnetycznej B od natężenia prądu płynącego w zwojnicy oraz zależności przenikalności magnetycznej od natężenia tegoż prądu. Trzeba tego dokonać posługując się wzorami (1) i (2).

Wyprowadzimy najpierw zależność μ od I . Ponieważ mamy wzór (4), to korzystając z (2) mamy

$$B = \mu \frac{0,4\pi n}{l} I \quad \left(= \mu_r \mu_0 \frac{nI}{l} \right). \quad (3)$$

Z drugiej strony z (1) otrzymujemy

$$B = \sqrt{\frac{F \cdot 10^5}{4,06 S}} \quad \left(= \sqrt{\frac{2\mu_0 F}{S}} \right). \quad (4)$$

Z (5) i (6) mamy

$$\mu \frac{0,4\pi n}{l} I = \sqrt{\frac{F \cdot 10^5}{4,06 S}} \quad \left(\mu_r \mu_0 \frac{nI}{l} = \sqrt{\frac{2\mu_0 F}{S}} \right), \quad (5)$$

skąd

$$\mu = \frac{l}{0,4\pi n} \sqrt{\frac{10^5}{4,06 S}} \cdot \frac{\sqrt{F}}{I} \quad \left(\mu_r = \frac{l}{n} \sqrt{\frac{2}{S\mu_0}} \cdot \frac{\sqrt{F}}{I} \right). \quad (6)$$

W tym wyrażeniu wielkości l (długość zwojnicy), n (liczba zwojów), S (pole przekroju kotwiczki) są stałe. Natomiast wartość μ jest wprost proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z siły udźwigu F elektromagnesu i odwrotnie proporcjonalna do natężenia prądu płynącego w uzwojeniu elektromagnesu.

Z pomiarów otrzymano: $l = 4,5$ cm (długość zwojnicy) oraz $d = 0,82$ cm (średnica kotwiczki). Liczba zwojów podana na osłonie zwojnicy wynosiła $n = 600$.

Po podstawieniu stałych do (5) i obliczeniu otrzymujemy

$$B \approx 216 \frac{\text{Gs}}{\sqrt{G}} \cdot \sqrt{F} \quad \left(\approx 0,218 \frac{\text{T}}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{F} \right) \quad (7)$$

oraz podstawiając do (6):

$$B \approx 168 \frac{\text{Gs}}{\text{A}} \cdot \mu I \quad \left(\approx 1,68 \cdot 10^{-2} \frac{\text{T}}{\text{A}} \cdot \mu_r I \right). \quad (8)$$

Wtedy otrzymujemy

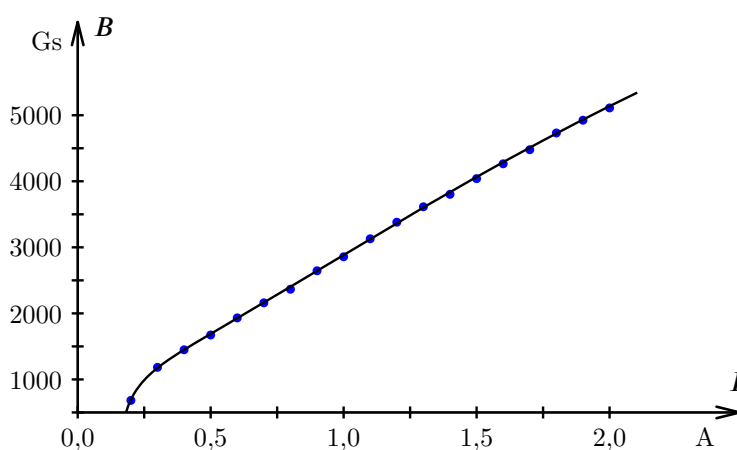
$$\mu \approx 1,29 \frac{\text{A}}{\sqrt{G}} \cdot \frac{\sqrt{F}}{I} \quad \left(\mu_r \approx 13,0 \frac{\text{A}}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sqrt{F}}{I} \right). \quad (9)$$

W wyniku obliczeń uzyskano wartości μ i B podane w tabeli 1.

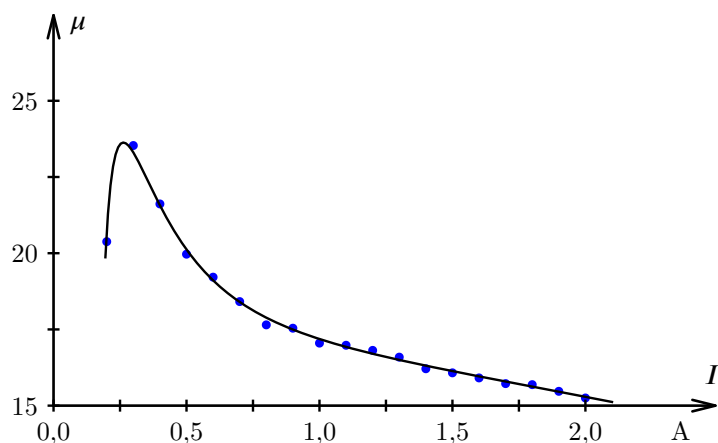
Tabela 1*

I, A	F, G	F, N	μ	B, Gs	B, T
0,2	10	0,10	20,4	683	0,0683
0,3	30	0,29	23,5	1183	0,1183
0,4	45	0,44	21,6	1449	0,1449
0,5	60	0,59	20,0	1673	0,1673
0,6	80	0,78	19,2	1932	0,1932
0,7	100	0,98	18,4	2160	0,2160
0,8	120	1,18	17,6	2366	0,2366
0,9	150	1,47	17,5	2645	0,2645
1,0	175	1,72	17,1	2827	0,2827
1,1	210	2,06	17,0	3130	0,3130
1,2	245	2,40	16,8	3380	0,3380
1,3	280	2,75	16,6	3614	0,3614
1,4	310	3,04	16,2	3802	0,3802
1,5	350	3,43	16,1	4040	0,4040
1,6	390	3,82	15,9	4265	0,4265
1,7	430	4,22	15,7	4478	0,4478
1,8	480	4,71	15,7	4731	0,4731
1,9	520	5,10	15,5	4925	0,4925
2,0	560	5,49	15,3	5111	0,5111

* Tabela została uzupełniona o wartości F i B w układzie SI (przyp. red.).

Rys. 3 ⁽⁹⁾

⁹ Punkty na wykresie tym i następnym są na podstawie wyników z tabeli 1, krzywe zostały wygenerowane poprzez numeryczne dopasowanie zależności F od I , a następnie użyciu wzorów (10) i (11) (przyp. red.).



Rys. 4

Zależności te przedstawiono na wykresach (rys. 3 i 4).

Największymi błędami¹⁰ były obarczone wyniki pomiarów siły ze względu na to, że odczytywanie wskazań siłomierzu w chwili odrywania kotwiczki od rdzenia nie jest łatwe. Większość pomiarów siły i natężenia prądu była przeto dokonywana pięciokrotnie. (Zawodnicy ze względu na czas, którym dysponowali przeważnie powtarzali pomiary trzykrotnie).

Należy oczywiście liczyć się z tym, że wskazania siłomierzu również wykazują pewne odchylenia.

Dokładność pomiarów natężenia prądu zależy naturalnie w dużym stopniu od jakości miernika. Tak więc odczytywanie natężenia prądu również obarczone jest błędem. Niemałą rolę odgrywa również staranne zmontowanie układu. Łączenia przewodów z zaciskami miernika i źródła prądu należy dokonać tak, by nie było najmniejszych bodaj luzów.

Na wyniki pomiarów wpływa również tarcie. Idzie o to, że pręcik, który łączy kotwiczkę z siłomierzem przesunięty jest przez dwa małe otwory również przechodzi przez mały otwór w obudowie siłomierzu. Niewielkie skręcenie siłomierzu podczas przesuwania go celem oderwania kotwiczki wystarczy, by wskazanie siłomierzu uległo zmianie.

Nie można naturalnie pominąć błędów popełnionych przez eksperymentatorów wskutek niedoskonałości organów zmysłów ludzkich. Mimo wszystko niektórzy zawodnicy uzyskali zupełnie zadowalające wyniki.

¹⁰ Błąd pomiaru – określenie było stosowane w znaczeniu obecnej niepewności pomiaru a „błąd maksymalny” – niepewności granicznej.

Problematykę tą od 1993 r. reguluje *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, u nas w nauczaniu od 2018 r. *Rekomendacja Polskiego Towarzystwa Fizycznego dotycząca nauczania o opracowywaniu wyników pomiarów w szkołach* – www2022.ptf.net.pl/programy/edukacja/rekomendacja. (przyp. red.)