



X OLIMPIADA FIZYCZNA

(1960/1961)

ZAWODY III STOPNIA

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

Zadanie doświadczalne – D

Nazwa – Wyznaczanie składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego korzystając z woltametri miedziowego.

Źródła – Komitet Główny Olimpiady Fizycznej

- Czesław Ścisłowski¹, *Fizyka w Szkole* nr 5, 1961, str. 289-294
- Aniela Nowicka², *Olimpiady Fizyczne IX i X*, 1965, str. 122-131
- T.M. Molenda (red.), IF US, www.OF.szc.pl.

Mając do dyspozycji: zwojnicę (o podanym promieniu) z igłą magnetyczną, źródło prądu, wagę, odważniki, woltametr miedziowy³ – wyznacz składową poziomą magnetyzmu ziemskiego.

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

² Aniela Nowicka była członkiem KGOF od II OF do XVI OF; w ww. książce zad. III st. X OF opracował dr Stefan Czarnecki, autor książek *Olimpiady Fizyczne I-IV*, *Olimpiady Fizyczne VII i VIII* (przyp. red.).

³ Woltametr miedziowy stanowi grubościenne naczynie szklane wypełnione wodnym roztworem siarczanu miedziowego i zawierające miedziane elektrody; podczas przepływu prądu elektrycznego miedź osadza się na katodzie, następnie po ważeniu, można wyznaczyć równoważnik elektrochemiczny miedzi i stałą Faradaya (zad. 7-III-T2 było z woltametrem srebrowym); przyrząd był na wyposażeniu szkolnej pracowni fizycznej (przyp. red.).

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

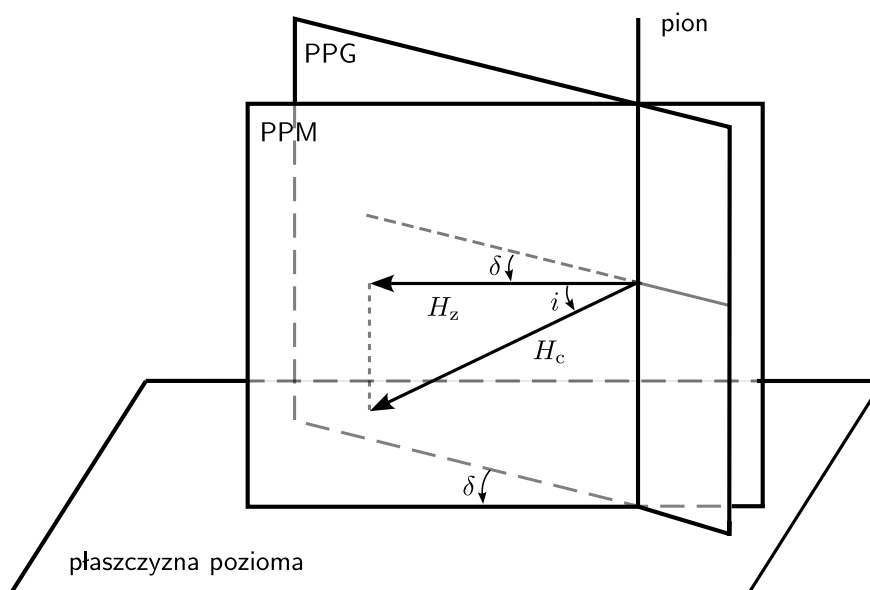
Część teoretyczna

Kula ziemską posiada, jak wiemy, swoje własne pole magnetyczne. Bieguny magnetyzmu ziemskiego nie pokrywają się z biegunami geograficznymi, nic dziwnego zatem, że linie pola magnetycznego Ziemi odbiegają od południków geograficznych. Linie te przebiegają ponadto wyraźnie nieregularnie, co jest wywołane m.in. przez rozmaity skład skorupy ziemskiej. Ponieważ bieguny magnetyczne leżą nie na powierzchni, lecz w głębi Ziemi, linie pola magnetycznego nie są równoległe do płaszczyzny horyzontu.

Scharakteryzowanie pola magnetycznego w jakimś punkcie powierzchni Ziemi sprowadza się do znalezienia trzech wielkości (rys. 1):

1. rzutu H_z wektora całkowitego natężenia pola H_c na płaszczyznę poziomą, który wyznacza tzw. południk magnetyczny, a nosi nazwę *składowej poziomej magnetyzmu ziemskiego*;
2. kąta δ między płaszczyznami południka magnetycznego (PPM) i południka geograficznego (PPG), zwanego deklinacją;
3. kąta i , jaki tworzy wektor całkowitego natężenia pola magnetycznego Ziemi H_c z płaszczyzną poziomą (inklinacja).

Te trzy parametry charakteryzują w zupełności pole magnetyczne Ziemi w danym punkcie⁴.



Rys. 1. Wizualizacja wektora całkowitego ziemskiego pola magnetycznego H_c i jego rzutu na płaszczyznę poziomą H_z oraz kąta deklinacji i inklinacji opisanych powyżej (przyp. red.)⁵

Zadanie nasze polega na doświadczalnym wyznaczeniu pierwszego z wymienionych parametrów, a mianowicie składowej poziomej pola magnetycznego Ziemi H_z .

⁴ Wielkości te jednak nie są stałe, ale ulegają zmianom w czasie — zarówno powolnym, dostrzegalnym dopiero po wielu latach, jak i powtarzającym się w sposób więcej lub mniej regularny, czyli okresowym. Czasem obserwujemy tzw. burze magnetyczne, towarzyszące zwykle zorzom polarnym, w czasie których wspomniane parametry ulegają nieraz gwałtownym nieregularnym wahaniom. Istnieje wiele specjalnych obserwatoriów geofizycznych, które rejestrują w sposób ciągły zmiany magnetyzmu ziemskiego. W Świdrze koło Warszawy pracuje takie obserwatorium, założone przed wielu laty przez zasłużonego badacza magnetyzmu ziemskiego, prof. Stanisława Kalinowskiego. (przyp. z książki)

⁵ Rys. ten i następane zostały wykonane bazując na rys. zamieszczonych w książce (A. Nowicka) (przyp. red.).

Zwojnica⁶, jaką dysponował zawodnik, składała się z kilku, tuż przy sobie nawiniętych zwojów cienkiego izolowanego przewodnika o średnicy kilkunastocentymetrowej. Umocowana była na podstawie w taki sposób, że jej oś skierowana była poziomo, a zwoje leżały w płaszczyźnie pionowej. W poziomej płaszczyźnie średnicowej zwojnicy umieszczony był stolik zaopatrzony w podziałkę kątową, z małym pionowym ostrzem, na którym można było ustawić igłę magnesową. Igła miała małe wymiary – długość jej nie przekraczała 15 mm, ale posiadała prostopadle do niej przyklejony bardzo lekki pręcik, który odgrywał rolę wskazówki przy odczytywaniu kątów.

Wiemy, że gdy przez przewodnik kołowy płynie prąd o natężeniu I , to w środku pierścienia powstaje pole magnetyczne o natężeniu

$$H = \frac{2\pi I}{10r} \left(= \frac{I}{2r} \right) \quad (7), \quad (1)$$

gdzie r oznacza promień pierścienia. Kierunek wektora H jest prostopadły do płaszczyzny pierścienia, a jego zwrot łatwo jest określić posługując się choćby mnemotechniczną regułą Ampère'a⁸.

W naszym przypadku mamy do czynienia ze zwojnicą złożoną z n zwojów, więc natężenie pola magnetycznego w środku zwojnicy jest sumą natężeń (1) dla liczby n zwoi i wyrazi się wzorem

$$H = \frac{\pi I n}{5r} \left(= \frac{nI}{2r} \right). \quad (1')$$

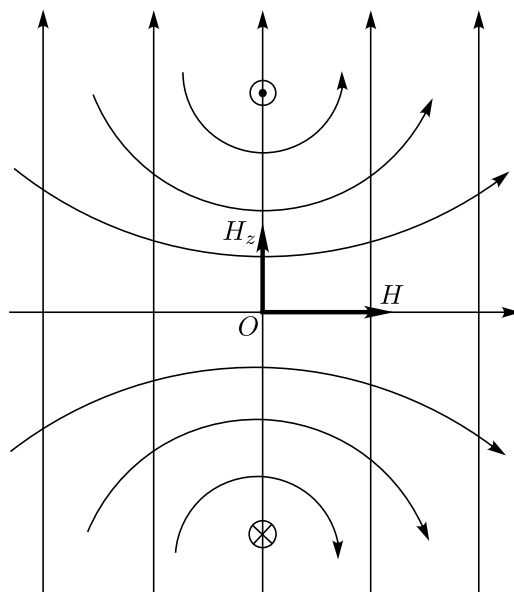
Na igłę umieszczoną na ostrzu wewnątrz zwojnicy działają dwa momenty sił, starające się ją skrócić, każdy w przeciwną stronę. Jeden z nich wywołany jest przez pole ziemskie, drugi zaś przez pole magnetyczne, jakie wytwarza prąd płynący przez zwoje. Zasada pomiaru polega na obserwacji stanu równowagi, gdy oba momenty są równe i przeciwnie skierowane. Szczególnie prostym przypadkiem będzie ten, w którym zwojnica jest ustawiona w płaszczyźnie południka magnetycznego – rys. 2 – wtedy bowiem kierunki pola H i H_z są do siebie prostopadłe. Kółeczko z kropką i kółeczko z krzyżykiem oznaczają przekroje płaszczyzną pionową kołowego przewodnika z prądem (dla uproszczenia rysunku wzięto jeden zwoj), przy czym krzyżyk symbolizuje kierunek prądu od nas za płaszczyznę rysunku, kropka zaś — przeciwnie — kierunek do czytającego.

Pole magnetyczne Ziemi (mowa tylko o składowej poziomej, ponieważ tylko ona może wywołać ruch igły mającej swobodę obrotu jedynie w płaszczyźnie poziomej) rozpatrywane w niewielkim obszarze może być uważane za jednorodne. Nie można jednak tego samego powiedzieć o polu wytworzonym przez zwojnicę. Jej pole możemy uważać za jednorodne jedynie w najbliższym otoczeniu punktu O , czyli jej środka. Dlatego to, jak zaznaczono wyżej, igła magnetyczna musiała mieć małe rozmiary w porównaniu ze zwojnicą.

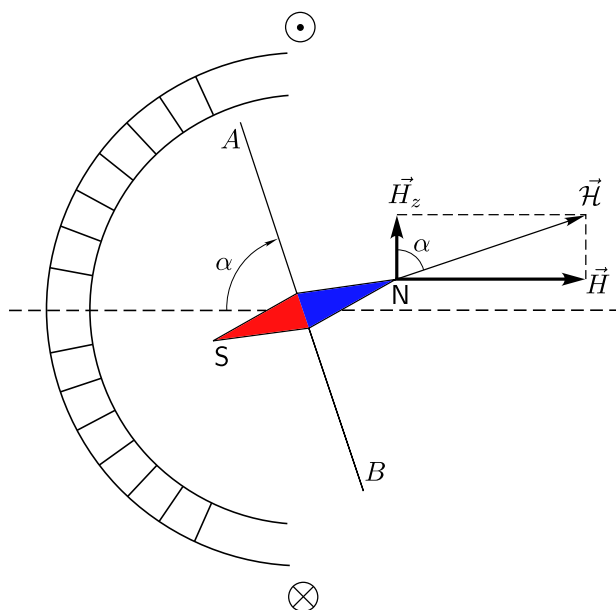
⁶ Zwojnica, z danych zamieszczonych w *Fizyka w Szkole*, miała 2 lub 3 zwoje zabezpieczone oporem dopuszczającym przepływ prądu o natężeniu ok. 0,8 A (przyp. red.).

⁷ We wzorze wielkości mają następujące jednostki: H – Oe (ersted), I – A (amper), r – cm; Oe (ersted) jest jednostką natężenia pola magnetycznego w układzie CGS (centymetr, gram, sekunda): 1 Oe = $10^3/(4\pi)$ A/m; współczynnik proporcjonalności $2\pi/10$ we wzorze jest związany z ówczesnymi def. jednostek. W układzie jednostek SI współczynnik proporcjonalności we wzorze wynosi $1/2$, tj. $H = I/(2r)$, postać tą przy wzorze (1) zapisano w nawiasie. Przy dalszych wzorach również dopisano w nawiasie wzór w układzie SI. (przyp. red.)

⁸ Mnemotechniczna reguła Ampère'a, znana też jako reguła prawej ręki, służy do określania kierunku pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem: jeśli trzymasz przewodnik prawą ręką tak, aby kciuk wskazywał kierunek prądu (I), to pozostałe palce otaczające przewód wskażą zwrot linii pola magnetycznego wytworzonego przez prąd elektryczny w tym przewodzie. Istnieją też inne formy, jak reguła korkociągu (śruby prawoskrętnej) czy pływaka, które dają ten sam wynik. W tym przypadku przydatną jest następująca reguła: jeżeli patrząc na obwód kołowy widzimy, że prąd płynie w kierunku niezgodnym w kierunku ruchu wskazówek zegara, to biegun, na który patrzymy, jest biegunem północnym (N); w przeciwnym razie jest to biegun południowy (S). (przyp. red.)



Rys. 2. Schemat przebiegu linii pola magnetycznego Ziemi, jak również linii pola magnetycznego pochodzącego od zwojnicy. Kółko z kropką oznacza kierunek prądu nad płaszczyznę rysunku (kierunek do czytelnika), natomiast kółko z krzyżykiem, kierunek pod płaszczyznę rysunku (od czytelnika)



Rys. 3. Schematycznie przedstawiony układ pomiarowy z igłą magnetyczną (SN) – ustawioną w płaszczyźnie zwoju zwojnicy i linii ziemskiego pola magnetycznego – wskazówką (o kierunku AB , zamocowaną prostopadłe do igły magnetycznej) do odczytu kąta wychylenia α na podziałce kątowej. Zaznaczono wektory natężeń pola magnetycznego: \vec{H}_z – ziemskiego, \vec{H} – pochodzącego od zwojnicy, \vec{H} – wypadkowego (przyp. red.)

Na powyższym rys. igła magnetyczna (przesadnie duża) jest ustawiona w położeniu równowagi, czyli w kierunku wektora wypadkowego natężenia pola magnetycznego \vec{H} , który jest oczywiście sumą geometryczną wektorów \vec{H}_z i \vec{H} . Oznaczony przez α kąt odchylenia igły magnetycznej od kierunku północnego (ściślej mówiąc, od płaszczyzny południka magnetycznego), odczytany przy pomocy wskazówki o kierunku AB , to z prostokąta, który tworzą H_z i H , mamy natychmiast

$$\frac{H}{H_z} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

a z wyrażeń (1') i (2) otrzymujemy

$$H_z = \frac{\pi I n}{5r \operatorname{tg} \alpha} \left(= \frac{nI}{2r \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (3)$$

W równaniu (3) n i r są znane, kąt α łatwo odczytać, pozostają więc dwie nieznanne wielkości H_z i I . Opisany przyrząd, z uwagi na występującą w równaniu (3) funkcję trygonometryczną – nosi nazwę busoli tangensów, lub krócej tangens-busoli⁹, lub busoli stycznych¹⁰.

Dla wyznaczenia H_z potrzebna jest znajomość wartości natężenia prądu I . Wartość tę znajdziemy na innej drodze, a drogą tą, jak sugeruje dołączenie do zestawu eksperymentalnego – miedzianego woltametri¹¹ i wagi, będzie metoda elektrolityczna.

Musimy się tu oczywiście posłużyć pierwszym prawem Faradaya

$$m = kIt, \quad (4)$$

gdzie m jest masą miedzi wydzielonej w czasie t przez prąd o natężeniu I , a k równoważnikiem elektrochemicznym (w naszym przypadku – miedzi), którego wartość znajdziemy w tablicach. Można też postąpić inaczej, pamiętając masę atomową M miedzi oraz liczbę Faradaya $F = 96500$ C, która oznacza ładunek, jaki musi przepłynąć przez elektrolit, by wydzielił się jeden równoważnik gramowy R . Wtedy, biorąc pod uwagę, że $R = M/w$ – gdzie w jest wartościowością, a M gramatomem (liczbowo równym masie atomowej) miedzi – możemy rozumować tak:

Jeśli F kulombów wydziela M/w gramów, to 1 kulomb wydziela $M/(wF)$ gramów. Ponieważ zaś równoważnik elektrochemiczny jest to masa substancji wydzielonej przez nabój równy jednemu kulombowi, to

$$\frac{M}{wF} = k, \quad (5)$$

a stąd

$$m = \frac{MI t}{wF}. \quad (6)$$

Jest to właśnie połączenie obu praw Faradaya w jednym wzorze.

Korzystając z (3) i (4) mamy

$$H_z = \frac{\pi n m}{5r k t \operatorname{tg} \alpha} \left(= \frac{n m}{2r k t \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (7)$$

⁹ Gdy znamy dokładnie, w danym miejscu, wartość składowej poziomej H_z , przyrząd pozwala mierzyć natężenie prądu I , jest więc pewnego rodzaju amperomierzem. Wtedy $I = (5r H_z / \pi n) \operatorname{tg} \alpha$. W ułamku, w tym przypadku, występują same znane wielkości, nosi on nazwę współczynnika redukcyjnego tangensbusoli. Współczynnik redukcyjny, oznaczany zwykle symbolem C , jest wielkością stałą dla danej tangensbusoli i dla danego miejsca na Ziemi. Mamy wówczas po prostu $I = C \operatorname{tg} \alpha$. (przyp. z książki)

¹⁰ Busola stycznych – przyrząd fizyczny do pomiaru składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego (lub innych słabych pól), składający się z płaskiej cewki pierścieniowej (zazwyczaj w płaszczyźnie południka) i małej igły magnetycznej w jej środku, która odchyła się pod wpływem prądu płynącego przez cewkę; pomiar polega na znalezieniu tangensa kąta odchylenia igły. Jeśli składowa pozioma pola magnetycznego Ziemi jest znana pozwala to również mierzyć natężenie prądu płynącego przez cewkę. (przyp. red.)

¹¹ Zob. przypis 3 (przyp. red.).

biorąc zaś pod uwagę (3) i (6):

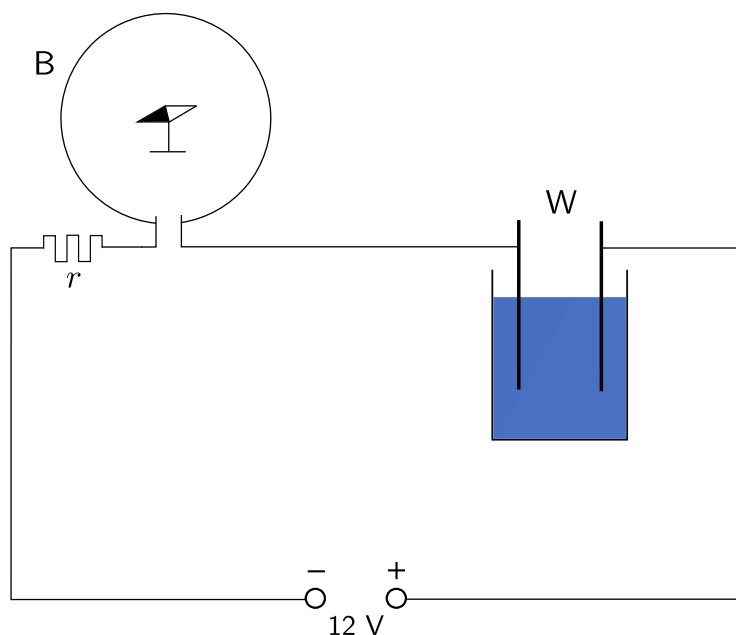
$$H_z = \frac{\pi n m w F}{5 r M t \operatorname{tg} \alpha} \left(= \frac{n m w F}{2 r M t \operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (7')$$

Część doświadczalna

Zawodnicy mieli do dyspozycji zwojnicę o kilku zwojach, które należało policzyć. Wartość promienia zwojnicy była wypisana na pierścieniu, na którym były nawinięte zwoje. Zwojnica miała w środku umieszczoną krótką igłę magnetyczną (ok. 1,5 cm) poruszającą się tylko w płaszczyźnie poziomej oraz podziałkę kątową. Prostopadle do tej igielki był przyklejony bardzo lekki pręcik – na rys. 3 kierunek AB , który odgrywał rolę wskazówki przy odczytywaniu kątów. Budowa przyrządu decydowała więc, że stanowił on busolę stycznych (tangensów). Busolę zabezpieczona była przewodem oporowym dopuszczającym przepływ prądu o natężeniu około 0,8 A. Busolę należało najpierw ustawić tak, aby południk pola magnetycznego Ziemi leżał w płaszczyźnie zwojnicy. Stosunkowo łatwo było tego dokonać posługując się wskazówką i skalą kątową na stoliku busoli stycznych - wskazówka powinna wskazywać zero na skali.

Ważną czynnością jaką uczeń powinien wykonać przed rozpoczęciem doświadczenia to bardzo dokładne oczyszczenie papierem szklistym elektrod woltametry, przepłukania ich w wodzie destylowanej i staranne wysuszenie (były dostępne specjalne suszarki). Elektrody należało potem bardzo dokładnie zważyć, oczywiście każdą osobno, i umieścić w woltametrze.

Rys. 4 przedstawia schemat układu doświadczalnego do wyznaczenia wartości H_z , korzystając ze wzoru (7) lub (7'), na którym przyrządy: woltametr W , busola stycznych B , opornik r są połączone szeregowo ze źródłem napięcia. Źródłem napięcia była centralna bateria akumulatorów o SEM 12 V, od której były odprowadzane przewody z kontaktami do podłączenia każdego zestawu doświadczalnego.



Rys. 4. Schemat obwodu elektrycznego użytego do zasilania zwojnicy i woltametry

Pomiary sprowadzały się do wyznaczenia czasu przepływu prądu elektrycznego przez zwojnicę w czasie elektrolizy, którego odpowiednie dobranie jest istotne. Czas ten nie może być za

krótki, wtedy bowiem masa wydzielonej miedzi byłaby bardzo mała, a względny błąd¹² przy jej wyznaczaniu znaczny. Doświadczenie powinno trwać od 20 do 30 minut.

Istotny jest również odpowiedni dobór wartości natężenia prądu elektrycznego, od którego zależy wielkość kąta wychylenia igły magnetycznej. Gdy kąt ten jest bardzo mały, dokładność jego odczytania jest niewielka, mały bowiem błąd w odczytaniu da bardzo duży błąd względny. Z drugiej strony, przy zbyt dużym natężeniu prądu, a co za tym idzie, przy dużej wartości kąta, znowu maleje dokładność pomiaru. Oto wartość funkcji tangens dla argumentu dążącego do 90° dąży do nieskończoności. Małe błędy w odczytaniu wartości kąta α wywołają, jak to wynika ze wzorów (7) i (7'), bardzo znaczne odchylenia szukanej wartości H_z . Bliższe rozważania prowadzą do wniosku, że najkorzystniejszy jest obszar kątów w pobliżu 45°.

W naszym przypadku wartości natężenia prądu były w poszczególnych zestawach dobrane już uprzednio przez asystentów drogą odpowiedniego dopasowania oporów r .

Po tych ustawieniach i ustaleniach - zaplanowaniu odpowiedniego czasu pomiaru i wartości natężenia prądu - należało uruchomić stoper zamykając jednocześnie obwód.

Po upływie ustalonego czasu t obwód prądu przerywamy, wyłączając jednocześnie stoper; elektrody znowu starannie płuczemy w wodzie destylowanej, suszymy i dokładnie ważymy. Przyrost masy na katodzie powinien być równy ubytkowi na anodzie. Rozbieżność wskazuje najczęściej na niestaranne wysuszenie lub błąd w ważeniu. Czasem jednak może się zdarzyć, zwłaszcza przy zbyt dużym natężeniu prądu i niestarannym oczyszczeniu elektrod (ślady – np. tłuszczu z palców), że osadzająca się miedź nie trzyma się katody i przy płukaniu zmywa się. Wtedy przyrost masy katody jest znacznie mniejszy od ubytku masy anody. W takim przypadku należy raczej wierzyć anodzie. Przy starannej i prawidłowej pracy drobne różnice, jakie mogą wystąpić, należy położyć na karb niewielkich błędów przypadkowych przy ważeniu; najdokładniejszą wartość m otrzymamy, biorąc średnią przyrostu masy katody i ubytku masy anody¹³.

Podstawiając dane liczbowe do wzoru (7) lub (7') otrzymamy składową poziomą H_z . Cały pomiar powinno się oczywiście powtórzyć kilkakrotnie i przyjąć wartość średnią. Ze względu na ograniczony czas, jakim dysponowali zawodnicy, niewielu z nich zdołało wykonać więcej niż jeden pomiar.

Oto dane liczbowe z oryginalnej pracy jednego z uczestników:

| | |
|---------------------------------|-----------------------|
| Promień zwojnicy | $r = 7,3$ cm |
| Liczba zwojów | $n = 2,9$ |
| Masa katody przed pomiarem | $m_{1k} = 59,850$ g |
| Masa katody po pomiarze | $m_{2k} = 60,250$ g |
| Przyrost masy katody | $m_k = 0,400$ g |
| Masa anody przed pomiarem | $m_{1a} = 55,500$ g |
| Masa anody po pomiarze | $m_{2a} = 55,100$ g |
| Ubytek masy anody | $m_a = 0,400$ g |
| Czas elektrolizy | $t = 36$ min = 2160 s |
| Kąt odchylenia | $\alpha = 45^\circ$ |
| Równoważnik elektrochemiczny Cu | $k = 0,000329$ g/C |

Podstawiając do wzoru (7) otrzymamy:

¹² Błąd pomiaru - określenie było stosowane w znaczeniu obecnej niepewności pomiaru a „błąd graniczny” - 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 - www.2022.ptf.net.pl/programy/edukacja/rekomendacja. (przyp. red.)

¹³ Zob. Dodatek na str. 9–10 (przyp. red.).

$$H_z = \frac{\pi \cdot 2,9 \cdot 0,4}{5 \cdot 7,3 \cdot 0,000329 \cdot 2160 \cdot 1} \text{Oe} \approx 0,141 \text{Oe} (\approx 11,18 \text{A/m}). \quad (8)$$

Rachunek przeprowadzimy jeszcze raz posługując się wzorem (7'). Ponieważ masa atomowa miedzi $M = 63,54$, a wartościowość miedzi $w = 2$, otrzymamy:

$$H_z = \frac{\pi \cdot 2,9 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot 96500}{5 \cdot 7,3 \cdot 63,54 \cdot 2160 \cdot 1} \text{Oe} \approx 0,141 \text{Oe} (\approx 11,17 \text{A/m}). \quad (8')$$

Obecnie zajmujemy się oszacowaniem dokładności pomiaru, ograniczając się do błędów przypadkowych¹⁴. Źródeł ich jest wiele:

1. Pomiar wydzielonej masy miedzi m jest wynikiem dwóch ważeń, z których każde może być obarczone błędem nie przekraczającym 0,02 g (wynika to z rodzaju użytej wagi). W najgorszym przypadku błąd bezwzględny może sięgać zatem $\Delta m = 0,04$ g (w istocie ze względu na zgodność m_a i m_k , jest na pewno mniejszy!)¹⁴.
2. Pomiar kąta mógł być dokonany z dokładnością dopuszczającą odchylenie $\Delta\alpha = 1^\circ$.
3. Pomiaru promienia zwojownicy¹⁴ dokonywano mierząc linijką szkolną jej średnicę. Błąd mógł wynieść 1 mm, zatem $\Delta r = 0,5$ mm.
4. Błąd przy wyznaczaniu liczby zwojów¹⁴ mógł sięgnąć $\Delta n = 0,05$.
5. Błąd w mierzeniu czasu¹⁴ przy użyciu stopera można z powodzeniem pominąć.

W najbardziej niekorzystnym przypadku mogło się zdarzyć, że np. wartości n i m były obciążone błędem niedomiarowym, a r i α błędem nadmiarowym; wtedy (patrz wzór (7)) prawdziwa wartość H_z wynosiłaby:

$$H'_z = \frac{\pi \cdot 2,95 \cdot 0,440}{5 \cdot 7,25 \cdot 0,000329 \cdot 2160 \cdot 0,966} \text{Oe} \approx 0,164 \text{Oe} (\approx 13,04 \text{A/m}). \quad (9)$$

Wartość H_z otrzymalibyśmy zatem o $\Delta H_z = (0,164 - 0,141) \text{Oe} = 0,023 \text{Oe} (\approx 1,86 \text{A/m})$ za małą. Gdybyśmy wzięli przypadek skrajnie przeciwny, tzn. założyli, że m i n były obciążone błędem nadmiarowym, a r i α błędem niedomiarowym, wtedy prawdziwa wartość H'_z byłaby mniejsza od otrzymanego H_z , również o około 0,023 Oe. Wartość 0,023 Oe jest to bezwzględny błąd graniczny, jakim może być obciążony nasz wynik. Prawdziwa wartość leży więc w granicach między 0,164 Oe, a 0,118 Oe. Ostateczny wynik naszego pomiaru możemy podać w następującej postaci:

$$H_z = (0,141 \pm 0,023) \text{Oe} (\approx (11,17 \pm 1,86) \text{A/m}). \quad (10)$$

- Błąd graniczny¹⁴ wynosi $\Delta H_z = 0,023 \text{Oe}$ (¹⁵).
- Błąd względny – $\Delta H_z/H_z = 0,16$.
- Błąd procentowy – 16 %.

¹⁴ Zob. przypis 10 i Dodatek na str. 9–10 (przyp. red.).

¹⁵ Obliczenie różnicy wartości skrajnych H'_z (maksymalnej) i H''_z (minimalnej) to tzw. rozstęp, połowa rozstępu jest oszacowaniem niepewności wyniku. W tym przypadku autor opracowania (dr Stefan Czarnecki) obliczył różnice $H'_z - H_z$ i $H_z - H''_z$, których wartości są takie same (prawie) więc nie możemy wnosić czy gdyby się różniły to byłaby obliczona ich wartość średnia, tj. połowa rozstępu, czy wybrana wartość większa, która byłaby przyjęta za niepewność wyniku pomiaru. W tym drugim przypadku mielibyśmy do czynienia z tzw. metodą najmniej korzystnego przypadku (NKP), która w latach 70. XX wieku była proponowana do szacowania niepewności wyniku funkcji pomiaru w praktyce szkolnej. Sposób ten nie jest stosowany - miesza dwa formalizmy: wielkości ekstremalnej i średniej, natomiast sposób z rozstępem jest stosowany, też w oszacowaniu niepewności w zad. OF. (przyp. red.)

Czytelnik z pewnością jest w tej chwili bardzo zdziwiony. Przecież wiadomo, że składowa pozioma magnetyzmu ziemskiego dla okolic Warszawy jest znacznie większa i wynosi około 0,19 Oe. Co zatem jest warta nasza dyskusja błędów, jeżeli tablicowa wartość H_z nie mieści się w granicach przez nas obliczonych?

Nie jest jednak tak źle i naszemu pomiarowi możemy w zupełności zaufać. Doświadczenie nie było przecież przeprowadzane na otwartej przestrzeni, a przeciwnie, w lokalu jak najbardziej do tego celu nieodpowiednim. Najrozmaitsze żelazne rury sieci wodociągów, sieci centralnego ogrzewania, żelazne zbrojenie betonu, nagromadzenie w budynku różnych żelaznych przyrządów i narzędzi w wysokim stopniu deformuje naturalne pole magnetyczne Ziemi. Wystarczy, gdy np. linie pola magnetycznego ulegną nieco większemu nachyleniu i , a natychmiast wartość $H_z = H_c \cos i$ będzie mniejsza. O wiarygodności naszego wyniku może świadczyć również zgodność wyników otrzymanych przez uczniów pracujących w tej samej sali blisko siebie. Po prostu otrzymaliśmy wartość H_z dla określonego miejsca w sali pierwszej pracowni studenckiej, na drugim piętrze gmachu Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie przy ul. Hożej 69, gdzie odbywały się zawody trzeciego stopnia.

Bezwzględne pomiary parametrów pola magnetycznego Ziemi są dokonywane w specjalnych obserwatoriach, przy budowie których nie użyto nawet jednego żelaznego gwoźdźca, lokalizowanych jak najdalej od osiedli ludzkich i szyn kolejowych, a w których pracownicy nie mogą nosić nawet stalowej szpilki w krawacie!

Prac dobrych (6–10 punktów) było 48,7 %.

Dodatek – Oszacowanie niepewności wyniku pomiaru (T. Molenda)

Opis oszacowania dokładności wyniku jest bardzo szczegółowy, niemniej obecnie, po ponad 60 latach od wydania książki, w której autorem opracowania rozwiązania zadania był dr Stefan Czarnecki, dołączamy poniższe oszacowanie niepewności, które bazuje na *Rekomendacji Polskiego Towarzystwa Fizycznego dotyczącej nauczania o opracowaniu wyników pomiarów w szkołach oraz Przykłady do „Rekomendacji PTF dotyczącej (...)”* –

– <https://www2022.ptf.net.pl/programy/edukacja/rekomendacja/>.

Wyniki pomiarów przytoczone wcześniej z pracy jednego z zawodników:

$$r = 7,3 \text{ cm}; \quad n = 3; \quad \alpha = 45^\circ; \quad t = 2160 \text{ s}; \quad m = 0,40 \text{ g}. \quad (11)$$

Pomiary bezpośrednie wykonane przez ucznia były jednokrotnymi, przyjmujemy, dla nich niepewność graniczną pojedynczego pomiaru, której nie zamieniamy na niepewność standardową. Odpowiadające niepewności graniczne dla wyników (11):

$$\Delta r = 0,05 \text{ cm}; \quad \Delta n = 0; \quad \Delta \alpha = 1^\circ; \quad \Delta t = 1 \text{ s}; \quad \Delta m = 0,02 \text{ g}. \quad (12)$$

Z treści zadania wiemy, że promień zwojnicy był podany, więc ostatnia cyfra (*najmniej znacząca*) w wartości promienia r określa wartość jej niepewności.

Ze źródła *Fizyka w Szkole* wiemy, że zwojnice były o 2 lub 3 zwojach. Zatem $\Delta n = 0$, bo należy wykluczyć pomyłkę przy zliczeniu 2 czy 3 zwojów. Intrygujące jest dlaczego uczeń podał wartość $n = 2,9$. Można domniemywać, że uznał odstęp między doprowadzającymi przewodami do zwojnicy jako niepełny zwój. Jednak dla przytoczonej wartości n odległość tych przewodów powinna wynosić 4,6 cm co raczej należy wykluczyć, gdyż przewody doprowadzające w zwojnicach są obok siebie.

Pomiar osadzonej na katodzie masy miedzi, na podstawie danych, powinno się obliczać jako średnią:

$$m = ((m_{2k} - m_{1k}) + (m_{1a} - m_{2a}))/2, \quad (13)$$

gdzie indeks k – dotyczy katody, natomiast a – anody.

Niepewność graniczna przy ważeniu elektrody wynosiła $20 \text{ mg} = 0,02 \text{ g}$. Zawodnik prawdopodobnie korzystał ze szkolnej wagi szalkowej, należy więc uznać tę wartość za pomiar z dużą dokładnością.

Wyznaczenie masy m jest pomiarem pośrednim, funkcja pomiaru jest opisana wzorem (13). Niepewność Δm obliczamy z prawa *przenoszenia (propagacji) niepewności* (pierwiastek z sumy kwadratów składników) co daje $\Delta m = 0,02 \text{ g}$.

Składowa pozioma magnetyzmu ziemskiego jest opisana funkcją pomiaru (7). Dla przyjętych w (12) wartości $H_z = 0,145 \text{ Oe}$ ($= 0,0185 \text{ A/m}$).

Niepewność ΔH_z obliczamy, podobnie jak dla Δm , z prawa *przenoszenia niepewności* i dla wartości niepewności (12), otrzymujemy $\Delta H_z = 0,009 \text{ Oe}$ ($= 0,0012 \text{ A/m}$). Czyli tak oszacowana niepewność, zgodnie z obecnie obowiązującymi regułami, jest ok. 2,5 raza mniejsza.