

ZADANIE C₅₋₈ **SPRAWDZANIE PRAWA JOULE'A-LENZA**

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne sprawdzenie słuszności prawa Joule'a-Lenza przez porównanie ilości energii wydzielonej w obwodzie prądu, jaka wynika z pomiarów kalorymetrycznych z ilością energii, jaka wynika z pomiarów elektrycznych. Pomiary prowadzone są w dwóch konfiguracjach:

- przy ustalonej oporności obwodu przy różnych wartościach napięcia,
- przy różnych opornościach, przez które płynie prąd o ustalonym natężeniu.

Masz do dyspozycji

- kalorymetr z aluminium,
- przyrządy pomiarowe: termometr, wagę, stoper i multimetr,
- drut oporowy w kształcie spiral w specjalnych „nóżkach” umożliwiających zanurzenie drutu w wodzie; całość wykonana z mosiądzu o masie 35 g,
- zasilacz stabilizowany, wyposażony w cyfrowe mierniki napięcia i natężenia,
- przewody,
- zworę w kształcie blaszki umożliwiającą połączenie równoległe spiral oporowych,
- wodę destylowaną.

Pomiar ilości wydzielonej energii dla różnych napięć, przy ustalonym oporze

- ważymy puste wewnętrzne naczynie kalorymetru,
- wlewamy do niego 200 ÷ 250 ml destylowanej wody,
- ważymy kalorymetr z wodą,
- umieszczamy wewnętrzne naczynie w kalorymetrze i przykrywamy je pokrywą z zamocowanymi spiralami i dołączamy termometr,
- na zasilaczu ustawiamy napięcia $U = 6 \text{ V}$,
- mierzymy temperaturę wody w kalorymetrze,
- spirale łączymy szeregowo, podłączamy do zasilacza i jednocześnie uruchamiamy pomiar czasu,
- odnotowujemy natężenie prądu płynącego w obwodzie oraz napięcie na spiralach,
- przerywamy przepływ prądu i jednocześnie zatrzymujemy pomiar czasu t w chwili, gdy temperatura wody wzrośnie o co najmniej 2 i nie więcej niż 5°C ; mierzymy temperaturę, jaka ustali się po wymieszaniu.

Powtarzamy pomiary dla napięć $U = 9, 12, 15$ i 18 V .

Pomiar ilości wydzielonej energii dla różnych oporów przewodnika, przy ustalonej wartości natężenia przepływającego prądu

- ustawiamy napięcie 20 V na zasilaczu,
- łączymy przewody w taki sposób, aby prąd mógł płynąć przez spirale połączone szeregowo,
- zamykamy na chwilę obwód i gałką regulacji prądu ograniczamy natężenie płynącego w obwodzie prądu do $2,0 \div 2,5 \text{ A}$,
- po wymieszaniu mierzymy początkową temperaturę wody w kalorymetrze,
- zamykamy obwód elektryczny i jednocześnie uruchamiamy pomiar czasu,
- odnotowujemy natężenie prądu płynącego w obwodzie oraz napięcie na spirali,
- przerywamy przepływ prądu i jednocześnie zatrzymujemy pomiar czasu t w chwili, gdy temperatura wody wzrośnie o co najmniej 2 i nie więcej niż 5°C ; mierzymy temperaturę, jaka ustali się po wymieszaniu.

Pomiary powtarzamy, łącząc kolejno obwód tak, że prąd płynie tylko przez jedną spiralę, w następnym pomiarze tylko przez drugą i w ostatnim pomiarze przez obie spirale połączone równoległe.

Na zakończenie pomiarów należy przy odłączonym napięciu przez pewien czas mierzyć temperaturę wody w kalorymetrze jako funkcję czasu. Wyniki mogą dać podstawę do oszacować strat w kalorymetrze.

ZADANIE C₅₋₈

SPRAWDZANIE PRAWA JOULE'A-LENZA

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne sprawdzenie słuszności prawa Joule'a-Lenza przez porównanie ilości energii wydzielonej w obwodzie prądu, jaka wynika z pomiarów kalorymetrycznych z ilością energii, jaka wynika z pomiarów elektrycznych. Pomiaru prowadzone są w dwóch konfiguracjach:

- przy ustalonej oporności obwodu przy różnych wartościach napięcia,
- przy różnych opornościach, przez które płynie prąd o ustalonym natężeniu.

Wprowadzenie teoretyczne

Jeśli między końcami przewodnika istnieje napięcie U wywołujące przepływ prądu elektrycznego o natężeniu I , to znamy moc $P_e = UI$ prądu elektrycznego. W czasie t przepływające ładunki wykonają pracę $W = qU = UIt$, a skoro zgodnie z prawem Ohma: $U = IR$, więc ostatecznie: $W = I^2Rt$. Związek ten stanowi treść prawa sformułowanego w 1840 przez Jamesa Joule'a. Prawo to wyraża I zasadę termodynamiki w odniesieniu do pracy prądu elektrycznego. Zasada ta mówi, że energię wewnętrzną układu można zmienić wykonując pracę nad układem (w tym przypadku praca prądu elektrycznego) lub dostarczając energii na sposób ciepła – **bardzo często używa się nieprawidłowego, acz poręcznego sformułowania, mówiąc o przepływie ciepła lub też używa słowa ciepło jakby to była forma energii lub synonim słowa energia**. Zasadniczo wyróżnia się trzy mechanizmy takiego przekazu energii na sposób ciepła:

- przewodnictwo,
- promieniowanie,
- konwekcja.

Pierwszy z wymienionych mechanizmów jest odpowiedzialny za przekazanie energii wydzielonej w procesie przepływu prądu elektrycznego w przewodniku do otoczenia, którym jest woda. W wodzie energia jest przenoszona przez konwekcję oraz przewodnictwo, co prowadzi do wyrównania temperatury w poszczególnych obszarach cieczy. Proces ten można przyspieszyć przez mieszanie. Dopiero w układzie będącym w **równowadze termicznej** temperatura jest „dobrym” parametrem – jest identyczna w każdej części układu. Należy też pamiętać, że również wewnętrzne naczynie kalorymetru jest elementem badanego układu.

Ilość energii przekazanej przez prąd płynący w przewodniku wyznaczamy umieszczając przewodnik w izolowanym termicznie naczyniu wypełnionym wodą destylowaną – kalorymetrze – oraz stosując kilka elementarnych zasad i definicji, które mówią, że:

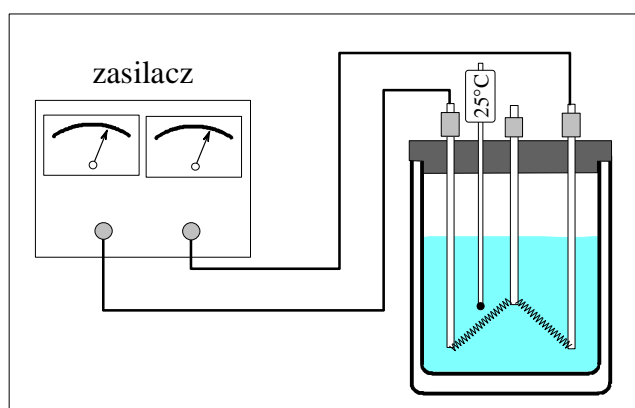
- Obowiązuje zasada zachowania energii: ilość energii oddanej przez ciało jest równa ilości energii pobranej przez ciała otaczające. W naszym wypadku oznacza to ogrzewanie nie tylko wody w kalorymetrze, ale także naczynia kalorymetrycznego.
- Ilość Q energii przekazywanej na sposób ciepła potrzebna do ogrzania ciała o masie m od temperatury początkowej T_p do temperatury końcowej T_k wyraża się wzorem $Q = c_w m (T_k - T_p)$. Współczynnik c_w , o wymiarze $\text{J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, nazywamy **cieplem właściwym**. Zadaje on ilość energii potrzebnej do podniesienia temperatury ciała o masie 1 kg o jeden kelwin. Iloczyn $c_w m$, o wymiarze J K^{-1} , nazywamy **pojemnością cieplną** ciała. Należy zaznaczyć, że temperatura początkowa i końcowa powinny być temperaturami równowagi termicznej, a więc sam proces ogrzewania nie powinien być gwałtowny, jeśli pomiary temperatury wykonujemy w trakcie ogrzewania lub, jeśli przerywamy ogrzewanie, to przed pomiarem powinniśmy wodę w kalorymetrze dobrze wymieszać. Znając dodatkowo czas t pomiaru, możemy wyznaczyć moc $P_k = Q/t$ wydzieloną w kalorymetrze.
- Jeśli układ doświadczalny składa się z kilku ciał obdarzonych masami m_i i charakteryzowanych ciepłami właściwymi c_i , to pojemność cieplna takiego układu jest sumą pojemności cieplnych elementów składowych.

Układ doświadczalny

Masz do dyspozycji:

- kalorymetr z aluminium,
- przyrządy pomiarowe: termometr, wagę, stoper i multimetr,
- drut oporowy w kształcie spiral w specjalnych „nóżkach” umożliwiających zanurzenie drutu w wodzie; całość wykonana z mosiądzu o masie 35 g,
- zasilacz stabilizowany, wyposażony w cyfrowe mierniki napięcia i natężenia,
- przewody,
- blaszaną zwórkę umożliwiającą połączenie równoległe spiral oporowych,
- wodę destylowaną.

Schemat układu pomiarowego jest przedstawiony na Rysunku 1. Przewodnik w postaci dwóch szeregowo połączonych spiral o oporze odpowiednio około 2 i 4 Ω umieszczamy w kalorymetrze wypełnionym wodą destylowaną. Przewodnik podłączamy do zasilacza stałonapięciowego o regulowanej wartości napięcia wyjściowego i regulowanej wartości ograniczenia prądowego. Czas przepływu prądu mierzymy stoperem, a temperaturę i masę wody w kalorymetrze wyznaczamy używając termometru i wagi. Układ jest wyposażony w mieszadło (nie zaznaczone na Rysunku), pozwalające mieszać zawartość kalorymetru.



Rys. 1. Układ pomiarowy

Planowanie pomiarów

Przed przystąpieniem do pomiarów należy zapoznać się ze stosownymi instrukcjami przyrządów wykorzystywanych w doświadczeniu oraz rozważyć następujące kwestie:

- Spirale grzejne wykonane z drutu oporowego mają oporność około 4 Ω i 2 Ω . Jak długo trzeba przepuszczać prąd wynikający z zasilania napięciem 6V aby podgrzać 200 g wody o 5°C? Jak dużo czasu potrzebujesz na wykonanie wszystkich pomiarów związanych z ogrzewaniem wody?
- Czy należy koniecznie używać wody destylowanej?
- Czy z wykonywanych pomiarów można wyznaczyć opory spiral?
- Dlaczego nie należy zbyt mocno podgrzewać wody?
- Jakie mogą być straty energii w kalorymetrze i z czego mogą wynikać? W jaki sposób można je oszacować? Jakie dodatkowe pomiary należałoby wykonać w tym celu?
- Jaki błąd w wyznaczaniu mocy wydzielonej w kalorymetrze można popełnić, zaniedbując pojemność cieplną spiral i doprowadzeń do nich?
- Przypuśćmy, że relację między napięciem na spiralach a natężeniem płynącego przez nie prądu stwierdzisz, że prawo Ohma nie obowiązuje lub też dojdiesz do wniosku, że oporność spiral zależy od temperatury, jak to zmodyfikuje Twoją procedurę weryfikacji słuszności prawa Joule'a-Lenza?

Wykonanie pomiarów

Odłącz od zasilacza wszelkie kable, skręć wszystkie pokrętki na lewo, prawie do minimum (ale nie do końca na minimum) i w porozumieniu z prowadzącym zajęcia włącz zasilacz. Chodzi o to,

że nim przystąpisz do pomiarów, zasilacz powinien się „grzać” przez pewien czas, aby osiągnął ustabilizowane warunki pracy.

Jeśli masz kłopoty z obsługą zasilacza, poproś prowadzącego zajęcia o wyjaśnienie funkcji wszelkich pokręteł, wyświetlaczy i gniazd wyjściowych.

Drugim ważnym elementem w ćwiczeniu jest kontrola jakości kontaktu między spiralami a „nóżkami”, do których są one przylutowane. Spirale i nożki wykonane są z metalu, który nie najlepiej łączy się z cyną i może pojawić się tzw. „zimny lut”, czyli wysokooporowy i luźny kontakt, dlatego przed przystąpieniem do pomiarów należy uważnie przyjrzeć się miejscom spojenia, a następnie miernikiem sprawdzić oporności obu spiral, które powinny wynosić około $2\ \Omega$ i $4\ \Omega$ (dokładne wartości zależą od zestawu). Obserwując wskazania omomierza, poruszaj delikatnie spiralami, jak również zwróć uwagę na to, czy występują jakiegokolwiek luzy drutu spiral na spojeniu. Stosowanie w tym przypadku omomierza nie ma na celu zmierzenie oporności spiral – chodzi o jakościową kontrolę połączeń lutowanych. Jeśli znalezione oporności będą wynosiły dziesiątki omów lub więcej, a także gdy zauważysz gwałtowne zmiany wskazań omomierza przy poruszaniu spiral, daj znać asystentowi prowadzącemu zajęcia.

W trakcie ogrzewania wody należy bacznie zwracać uwagę na wszelkie zmiany wskazywanego napięcia i natężenia płynącego prądu, jako że mogą być spowodowane niestabilną pracą zasilacza. Jeśli zauważysz nieregularne zmiany napięcia większe niż $0,2\ \text{V}$ lub natężenia większe niż $0,1\ \text{A}$, powiedz o tym prowadzącemu zajęcia.

Pamiętaj, aby wodę w kalorymetrze za każdym razem dobrze wymieszać przed odczytem jej temperatury.

Do dobrej praktyki należy zwracanie uwagi na typy używanych urządzeń, więc aby się w taką praktykę wdrażać, odnotuj typ zasilacza i podaj go w raporcie. Ta informacja może okazać się niezbędna do określenia niepewności pomiarowych wielkości prądu i napięcia.

Pomiar ilości wydzielonej energii dla różnych napięć, przy ustalonym oporze

- ważymy puste wewnętrzne naczynie kalorymetru;
- wlewamy do niego $200 \div 250\ \text{ml}$ destylowanej wody;
- ważymy kalorymetr z wodą;
- umieszczamy wewnętrzne naczynie w kalorymetrze i przykrywamy je pokrywą z zamocowanymi spiralami i dołączamy termometr;
- na zasilaczu ustawiamy napięcia $U = 6\ \text{V}$,
- mierzymy temperaturę wody w kalorymetrze,
- spirale łączymy szeregowo, podłączamy do zasilacza i jednocześnie uruchamiamy pomiar czasu,
- odnotowujemy natężenie prądu płynącego w obwodzie oraz napięcie na opornościach;
- przerywamy przepływ prądu i jednocześnie zatrzymujemy pomiar czasu t w chwili, gdy temperatura wody wzrośnie o co najmniej 2 i nie więcej niż 5°C ; mierzymy temperaturę, jaka ustali się po wymieszaniu.

Powtarzamy pomiary dla napięć $9, 12, 15$ i $18\ \text{V}$. W trakcie wykonywania pomiarów postaraj się na bieżąco wykonywać odręczny szkic ilustrujący prawo Ohma oraz zależność mocy wydzielonej w kalorymetrze jako funkcję kwadratu natężenia prądu. Daje to eksperymentatorowi możliwość elementarnego sprawdzenia poprawności uzyskanych danych.

Pomiar ilości wydzielonej energii dla różnych oporów przewodnika, przy ustalonej wartości natężenia przepływającego prądu

- ustawiamy napięcie $20\ \text{V}$ na zasilaczu,
- łączymy przewody w taki sposób, aby prąd mógł płynąć przez spirale połączone szeregowo,
- zamykamy na chwilę obwód i gałką regulacji prądu ograniczamy natężenie płynącego w obwodzie prądu do $2,0\ \text{A} \div 2,5\ \text{A}$,
- po wymieszaniu mierzymy początkową temperaturę wody w kalorymetrze,
- zamykamy obwód elektryczny i jednocześnie uruchamiamy pomiar czasu,
- odnotowujemy natężenie prądu płynącego w obwodzie oraz napięcie na spirali,
- przerywamy przepływ prądu i jednocześnie zatrzymujemy pomiar czasu t w chwili, gdy

temperatura wody wzrośnie o co najmniej 2 i nie więcej niż 5°C; mierzymy temperaturę, jaka ustali się po wymieszaniu.

Pomiary powtarzamy, łącząc kolejno obwód tak, że prąd płynie tylko przez jedną spiralę, w następnym pomiarze tylko przez drugą i w ostatnim pomiarze przez obie spirale połączone równolegle.

W trakcie wykonywania pomiarów postaraj się na bieżąco wykonywać odręczny szkic zależności mocy wydzielonej w kalorymetrze jako funkcję oporności. Daje to eksperymentatorowi możliwość elementarnego sprawdzenia poprawności uzyskanych danych.

Na zakończenie pomiarów należy, przy odłączonym zasilaczu, przez pewien czas mierzyć temperaturę wody w kalorymetrze jako funkcję czasu. Wyniki mogą dać podstawę do oszacować strat ciepłych.

Analiza wyników pomiarów

Przyjmij, że niepewność wskazań stopera, termometru i wagi zadane są wartością odpowiadającą najmniejszej działce tych przyrządów, natomiast dopuszczalny graniczny błąd Δ wartości x odczytanej z miernika zasilacza wynosi:

$$\Delta = \frac{w}{100} x + c,$$

gdzie wartości w oraz c są podane w instrukcji zasilacza. Niepewność u_x wskazania x szacujemy ze wzoru $u_x = \Delta/\sqrt{3}$.

Analizę danych uzyskanych w tym doświadczeniu można prowadzić pod różny kątem. Na przykład: dysponując wynikami pomiarów napięcia U na ustalonym połączeniu spiral i natężenia I płynącego przez nie prądu, można sprawdzić, czy opornik ten spełnia prawo Ohma. Jest to, bez wątplenia, cenny element kontroli danych, choć nie dotyczący zasadniczego aspektu doświadczenia.

Weryfikację słuszności prawa Joule'a-Lenza można przeprowadzić, sprawdzając – w danych z części pomiarowej z ustalonym opornikiem – zależność wydzielonej w kalorymetrze i zmierzonej metodą kalorymetryczną mocy $P_k = Q/t$ od natężenia I prądu płynącego przez opornik. Zakładając, że moc cieplna P_k jest równa, w warunkach przekazu energii bez strat, mocy P_e wyznaczonej z pomiarów elektrycznych, czyli $P_k = RI^2$, oczekujemy zależności kwadratowej. Szukając różnych zależności najlepiej jest przedstawiać dane w takich układach współrzędnych, w których badana zależność miałaby postać linii prostej. I tak, badając zależności o charakterze potęgowych wykorzystuje się współrzędne logarytmiczne (obie osie w skalach logarytmicznych). Wtedy współczynnik kierunkowy otrzymanej prostej wskazuje na potęgę występującą w badanej funkcji. W przypadku zależności wykładniczej stosujemy współrzędne „pół-logarytmiczne” (jedna oś w skali liniowej, a druga logarytmicznej). W naszym przypadku najlepiej jest wykreślić zależność mocy cieplnej od kwadratu natężenia prądu. Z wcześniejszych rozważań wynika, że współczynnik kierunkowy prostej to oporność spirali.

Podobnie, w drugiej części pomiarowej, kiedy to zmieniamy oporności spirali grzejnej, możemy zbadać tę że samą zależność, czyli $P_k = RI^2$, ale tym razem patrząc na moc P_k jako funkcję oporności spiral grzejnych. Alternatywnie, tę samą relację możemy zapisać w postaci $P_k = IU$ i badać moc P_k jako funkcję napięcia przy stałym natężeniu.

Niestety, wszystkie te podejścia mają tę słabość, że mimo prostych relacji modelowych, jakie łączą różne wielkości fizyczne, wymagają one dość złożonych narzędzi statystycznych, gdyż niepewności pomiarowe napięcia i natężenia, a także mocy wydzielonej w kalorymetrze nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, że jedna z mierzonych wielkości występujących w tych relacjach jest znana „dostatecznie dokładnie”. Oznacza to, że sprawdzając, na przykład, słuszność proporcjonalnego charakteru między mocą P_k wydzieloną w kalorymetrze, a opornością R wykorzystanych oporników, nie można zastosować powszechnie znanych schematów metody najmniejszych kwadratów – potrzebne jest bardziej rozbudowane podejście, uwzględniające zarówno niepewności zmiennej zależnej jak i niezależnej. W tej sytuacji analiza wspomnianych

zależności może mieć charakter jedynie graficzny, uzupełniony o jakościowe deklaracje i grube oszacowania.

Możemy jednak w sposób ścisły zweryfikować zgodność mocy, jaką wyznaczamy z pomiarów kalorymetrycznych z tą, jaką wyznaczamy z pomiarów elektrycznych. Wyobraźmy sobie, że dysponujemy serią jednoczesnych, wykonanych dwiema metodami, pomiarów tej samej wielkości fizycznej. Niech wartości x_i oraz y_i , $i = 1, 2, \dots, n$, przedstawiają, uzyskane w wyniku i -tego pomiaru, wartości mierzonej wielkości fizycznej każdą z metod, a wielkości $\sigma_{x,i}$ oraz $\sigma_{y,i}$ to odchylenia standardowe, z jakimi znane są wartości x_i oraz y_i . Ponieważ x_i oraz y_i to wyniki pomiaru tej samej wielkości, więc ich różnica powinna być zbliżona do zera. Jej rozbieżność z zerem możemy ocenić, stosownie ją normując, tj. dzieląc ją przez jej odchylenie standardowe, a całą serię pomiarową uwzględnić, sumując przyczynki od indywidualnych pomiarów:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{\sigma_{x,i}^2 + \sigma_{y,i}^2}. \quad (1)$$

Jeśli wyniki x_i oraz y_i pomiarów mają charakter gaussowski, wielkość R jest zmienną z rozkładu χ^2 o n stopniach swobody i dostarcza prostej miary zgodności.

Analiza wyników powinna obejmować następujące elementy.

- Wyznaczenie niezbędnych niepewności standardowych wielkości mierzonych bezpośrednio i pośrednio.
- Graficzne sprawdzenie prawa Ohma w konfiguracji pomiarowej z ustalonym oporem. Ze względu na przedstawione wyżej uwagi o niepewnościach pomiarów, wystarczy jakościowy komentarz odnośnie do wzoru, w jaki układają się punkty danych na wykresie oraz oszacowanie wartości R_0 oporności, o ile wykres na to zezwala.
- Analizę zależności oporności spirali od temperatury, uzupełnioną o stwierdzenie, wynikające z dostosowanej do warunków Twojego eksperymentu metody analizy danych, o występowaniu zależności między tymi wielkościami bądź braku tejże, jeśli wynik analizy z poprzedniego punktu dopuszcza takie postępowanie.
- Graficzne przedstawienie zależności między mocą P_k wydzieloną w kalorymetrze a kwadratem natężenia I prądu w obwodzie. Wykres powinien ukazywać punkty pomiarowe oraz modelową zależność $P_e = R_0 j$ mocy prądu elektrycznego jako funkcji zmiennej $j = I^2$, gdzie R_0 to wcześniej wyznaczona szacunkowa wartość oporności. Ze względu na przedstawione wyżej uwagi o niepewnościach pomiarów rozmaitych wielkości, jako konkluzja wystarczy jakościowy ustosunkowanie się do potencjalnej możliwości opisu danych w formie proporcjonalnej zależności $P_k = \alpha j$ i do zgodności współczynnika kierunkowego α z wcześniej wyznaczoną szacunkową wartością R_0 oporności.
- W konfiguracji z ustaloną opornością spirali ogrzewającej wodę, analizę relacji między mocą P_k wynikającą z pomiarów kalorymetrycznych a mocą P_e z pomiarów elektrycznych wraz z konkluzją, wynikającą z zastosowanej metody analizy danych, o zgodności wyników uzyskanych obiema metodami bądź braku takiej zgodności (wzór (1)).
- Graficzne przedstawienie zależności między mocą P_k wydzieloną w kalorymetrze a opornością R wykorzystywanych spiral. Rysunek powinien ukazywać punkty pomiarowe wraz z modelową zależnością $P_e = \beta R$, gdzie współczynnik $\beta = I_0^2$ to kwadrat natężeniem I_0 prądu, przy którym wykonywane były pomiary. Ze względu na przedstawione wyżej uwagi o niepewnościach pomiarów, jako konkluzja wystarczy jakościowy komentarz odnośnie do potencjalnej możliwości opisu danych w formie proporcjonalnej zależności $P_k = \gamma R$ i do zgodności współczynnika kierunkowego γ z wartością I_0^2 .
- W konfiguracji, w której zmieniane są układy spiral ogrzewających wodę, analizę relacji między mocą P_k wynikającą z pomiarów kalorymetrycznych a mocą P_e z pomiarów elektrycznych wraz z konkluzją, wynikającą z zastosowanej metody analizy danych, o zgodności wyników uzyskanych obiema metodami bądź braku takiej zgodności (wzór (1)).
- Prezentację graficzną relacji między mocą P_k i mocą P_e dla danych uzyskanych w obu częściach

pomiarowych wraz z łączną analizę obu zbiorów danych wraz z konkluzją o zgodności mocy wyznaczanych na dwóch drogach: kalorymetrycznej i elektrycznej bądź braku takiej zgodności.

- Ustosunkowanie się co do istotności, wraz z uzasadnieniem, obserwowanych fluktuacji napięcia i natężenia prądu, o ile takie były obserwowane.
- Graficzną prezentację zależności temperatury wody stygnącej w kalorymetrze od czasu wraz z Twą autorską analizą tej zależności i sugestią zastosowania jej wyników w celu uwzględnienia strat energii w kalorymetrze, o ile w ogóle istnieje taka potrzeba.

Istotne, w Twej opinii, kroki analizy danych podsumuj stosownymi tabelami z wynikami pośrednimi i zilustruj odpowiednimi rysunkami (które nie muszą być wykonane za pomocą komputerowego programu graficznego – nic nie umniejsza wartości Twej pracy, jeśli w raporcie umieścisz ręcznie wykonane, z dołożeniem wszelkiej staranności, rysunek np. na papierze milimetrowym).

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie modelowej zależności do danych metodą najmniejszych kwadratów wystarczy, że podasz jawną formę wielkości minimalizowanej, jako że postać ta jednoznacznie wyznacza oceny poszukiwanych współczynników modelowej zależności wraz z ich niepewnościami standardowymi i współczynnikiem korelacji i zbędnym jest cytowanie stosownych wzorów dla tych obiektów.

Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

W raporcie zamieść, w stosownie dobranych tabelach, wszystkie surowe wyniki wykonanych pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Zadbaj o wierne przeniesienie zmierzonych wartości do raportu.

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w opracowaniu *Instrukcja - Jak pisać raport końcowy* oraz z przykładową realizacją tych uwag w postaci *Przykładowy raport końcowy*. Materiały te zamieszczone są na stronie <http://anipw.igf.fuw.edu.pl> Pracowni wstępnej. Wymagania ukazane w tych opracowaniach będą bezwzględnie egzekwowane przy sprawdzaniu Twego raportu. W szczególności pamiętaj o konwencji odnoszącej się do precyzji przedstawiania niepewności, a co za tym idzie, również wartości wielkości zmierzonej.

Absolutnie zalecane jest świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie w bibliotece Wydziału do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

Literatura pomocnicza

- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, tom 3, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003;
- A. Zięba, *Analiza danych w naukach ścisłych i technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.

Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

Problem 1. Do kalorymetru wiano masę m_1 wody o temperaturze t_1 , po czym dolano do niego masę m_2 wody o temperaturze t_2 . Wyznacz temperaturę t_k końcową wody w naczyniu. Dla uproszczenia przyjmij, że naczynie ma zerową pojemność cieplną, tj. nie pobiera ciepła z wody ani go nie oddaje.

Problem 2. Do kalorymetru, w którym znajdowała się masa $m_1 = 200$ g wody w temperaturze $t_1 = 30^\circ\text{C}$ wrzucono kawałek lodu o masie $m_2 = 10$ g i temperaturze $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Oblicz temperaturę końcową, jaka się ustali. Ciepło właściwe c_w wody wynosi $4,2$ kJ/(kg·K), a ciepło topnienia c_t lodu wynosi 320 kJ·kg. Dla uproszczenia przyjmij, że kalorymetr ma zerową pojemność cieplną, tj. nie pobiera ciepła ani go nie oddaje. Rozwiąż to samo zadanie, jeśli masa lodu wynosi 100 g.

Problem 3. Do czajnika elektrycznego nalano wody o temperaturze $T = 10^{\circ}\text{C}$. Po czasie $t = 10$ min od momentu włączenia woda zagotowała się. Po jakim czasie woda całkowicie wyparuje? Dla uproszczenia przyjmij, że cała moc czajnika wykorzystywana jest na ogrzewania i gotowanie wody. Ciepło właściwe c_w wody wynosi $4,2$ kJ/(kg·K), a jej ciepło parowania $c_p = 2260$ kJ/kg.

Problem 4. Grzejnik podłączony do napięcia $U = 230$ V musi dostarczyć energię $E = 1$ kJ w ciągu 1 sekundy. Jaką oporność R powinien mieć opornik w tym grzejniku?

Problem 5. W przewodniku miedzianym o przekroju poprzecznym $S = 1$ mm² płynie prąd o natężeniu $I = 10$ mA. Oblicz średnią prędkość v uporządkowanego ruchu elektronów wzdłuż przewodnika. Przyjmij, że na każdy atom miedzi przypada jeden elektron przewodnictwa. Masa atomowa miedzi μ wynosi 84 g/mol, a jej gęstość ρ to $8,9$ g/cm³.

Problem 6. Jak długi powinien być drut oporowy o średnicy $D = 0,4$ mm potrzebny do sporządzenia spirali grzejnej o mocy $P = 0,5$ kW, która ma być włączona do sieci o napięciu $U = 230$ V? Opór właściwy ρ materiału, z którego wykonano drut, wynosi $1,3 \cdot 10^6$ $\Omega \cdot \text{m}$.

Problem 7. Zaciski baterii o sile elektromotorycznej E i oporności wewnętrznej r zwarto opornikiem o oporności R . Naszkicuj zależność a) natężenia prądu płynącego przez opornik R , b) mocy P_w wydzielanej na oporze wewnętrznym, c) mocy P_z wydzielanej na oporności R i d) sprawności źródła (sprawność źródła definiowana jest jako stosunek mocy P_z do całkowitej mocy) jako funkcję oporności R . Dla jakiej wartości R moc wydzielana na tym oporze jest największa?

Problem 8. Czajnik elektryczny posiada dwa uzwojenia. Przy włączeniu jednego z nich woda gotuje się po 15 minutach, przy włączeniu drugiego po 30 minutach. Po jakim czasie woda zagotuje się, jeśli oba uzwojenia połączymy a) szeregowo, b) równolegle?

Problem 9. Elementem nieliniowym w obwodzie elektrycznym nazywamy taki element, który nie spełnia prawa Ohma, tj. odłożone na nim napięcie U nie jest proporcjonalne do natężenia I płynącego przez prąd. Przypuśćmy, że element taki, scharakteryzowany zależnością $U = k\sqrt{I}$, gdzie $k = 0,5$ V/ $\sqrt{\text{A}}$, podłączono do baterii o sile elektromotorycznej $E = 4,5$ V szeregowo z oporem $R = 4$ Ω . Oblicz moc wydzielaną na elemencie.

Problem 10. Spirala grzejna kuchenki elektrycznej o oporności $R = 10$ Ω rozgrzewa się do temperatury wyższej o $\Delta t = 400^{\circ}\text{C}$ od temperatury powietrza. Jaka będzie różnica δ temperatur między spiralą a powietrzem, jeśli w obwód włączyć szeregowo dodatkowy opór $r = 10$ Ω ? Przyjmij, że szybkość odprowadzania ciepła do otoczenia jest proporcjonalna do różnicy temperatur między spiralą kuchenki i otaczającego ją powietrza.

Pytania i zadania przybliżające, uzupełniające lub poszerzające treść ćwiczenia

Problem 11. Do baterii o sile elektromotorycznej E podłączono szeregowo opór o oporności R i nienaładowany kondensator o pojemności C . Znajdź ilość energii, jaka wydzieli się na oporze w trakcie ładowania kondensatora.

Problem 12. W wodzie wypełniającej kalorymetr zanurzono podłączoną do napięcia spiralę o mocy P_s . Wyznacz zależność temperatury wody w funkcji czasu, jeśli pojemność cieplna kalorymetru z wodą wynosi C_k , temperatura otoczenia to T_0 , a kalorymetr oddaje energię do otoczenia zgodnie z Newtona prawem stygnięcia.

Wskazówka. Newtonowskie prawo stygnięcia ciała orzeka, że szybkość, z jaką zmienia się energia E stygnącego ciała jest proporcjonalna do różnicy temperatury ciała i otoczenia: $dE/dt = -k(T - T_0)$, gdzie k jest stałą zależną od stygnącego ciała.

Problem 13. Oporność grafitu zależy od temperatury T według prawa $R(T) = R_0/(1 + \alpha(T - T_0))$, gdzie T_0 jest ustaloną temperaturą, a R_0 opornością w tej temperaturze. Pręt wykonany z grafitu podłączamy do stałego napięcia U . Wyznacz zależność jego oporności od temperatury. Jaka ilość energii zostanie wydzielona w pręcie w ustalonym czasie t ? Moc wydzielana w graficie w temperaturze początkowej wynosi P_0 . Przyjmij, że stygnięcie pręta opisane jest prawem

Newtona, a pozostałe wielkości: masa m pręta, jego ciepło właściwe c_w , oporność R_0 , współczynnik α oraz współczynnik k proporcjonalności w prawie Newtona są znane.

Problem 14. Płaska płytka, emitująca promieniowanie jak ciało doskonale czarne, ustawiona jest prostopadle do kierunku padania promieni słonecznych ponad atmosferą ziemską. Oblicz temperaturę płytki po jej ustaleniu się. Przyjmij, że płytka nie odbiera promieniowania emitowanego przez Ziemię, a stała słoneczna S_S wynosi 1400 W/m^2 .

Wskazówka. Ciało emituje promieniowanie jak ciało doskonale czarne, jeśli moc P emitowana z powierzchni S tego ciała opisana jest prawem Stefana–Boltzmann, które głosi, iż wynosi $P = \sigma ST^4$, gdzie T jest temperatura absolutną, natomiast wielkość $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ to tzw. stała Stefana–Boltzmann. Stała słoneczna to ilość energii, jaka dociera ze Słońca na Ziemię do jednostki powierzchni w jednostce czasu.

Opracowanie: NN

Uzupełnienie: Roman J. Nowak i Andrzej Witowski, październik 2015