

ZADANIE C1

SPRAWDZANIE PRAWA JOULE'A-LENZA

Cel ćwiczenia

Prawo Joule'a-Lenza wyraża I zasadę termodynamiki w odniesieniu do pracy prądu elektrycznego i celem ćwiczenia jest doświadczalne sprawdzenie słuszności tego prawa przez:

- pomiar energii wydzielanej (i przekazanej do otoczenia) przy różnych wartościach natężenia prądu płynącego przez przewodnik o ustalonym oporze;
- pomiar energii wydzielanej (i przekazanej do otoczenia) przy różnych wartościach oporu przewodnika przez który płynie prąd o ustalonym natężeniu.

Wprowadzenie teoretyczne

Jeśli między końcami przewodnika istnieje napięcie U wywołujące przepływ prądu elektrycznego o natężeniu I , to wiemy, że moc prądu P_J wynosi UI . W czasie t przepływające ładunki wykonają pracę $W = qU = Ult$, 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, ale poręcznego sformułowania, mówiąc o przepływie ciepła lub też używa słowa ciepło jakby to była forma energii.** 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 i 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 wyznaczymy umieszczając przewodnik w izolowanym termicznie naczyniu wypełnionym wodą destylowaną – kalorymetrze – oraz stosując kilka elementarnych zasad i definicji, które mówią, że:

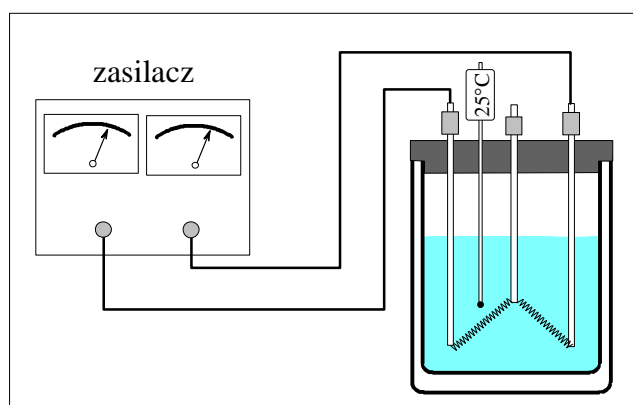
- Obowiązuje zasada zachowania energii: ilość energii oddanej przez ciało jest równa ilości energii pobranej przez ciała otaczające. W naszym wypadku oznacza to ogrzewanie nie tylko wody w kalorymetrze, ale także naczynia kalorymetrycznego.
- Ilość Q energii przekazywanej na sposób ciepła potrzebna do 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 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 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 $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, 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,
- proste przyrządy pomiarowe: termometr, wagę, stoper i multimetr CHY38,
- 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 zworkę 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 mieszadłko (nie zaznaczone na Rysunku),



Rys. 1. Układ pomiarowy

pozwalające mieszać zawartość kalorymetru.

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?
- 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?
- Czy z wykonywanych pomiarów można wyznaczyć opory spiral?
- Jaki błąd w wyznaczaniu mocy wydzielonej w kalorymetrze można popełnić, zaniedbując pojemność cieplną spiral i doprowadzeń do nich?
- Czy należy koniecznie używać wody destylowanej?

Wykonanie pomiarów

Odłącz od zasilacza wszelkie kable, skręć wszystkie pokrętła 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 stabilizowanego, 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 nóżki wykonane są z metalu, który nie najlepiej łączy się z cyną i może pojawić się tzw. „zimny lut”, dlatego przed przystąpieniem do pomiarów należy uważnie przyjrzeć się miejscom spojenia, a następnie miernikiem CHY38 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 celu zmierzenia 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.

I. Pomiar ilości wydzielonej energii dla różnych napięć, przy ustalonym oporze

- ważymy puste wewnętrzne naczynie kalorymetru;
- wlewamy do niego $200 \div 250$ 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 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 $18\ \text{V}$. Na zakończenie cyklu pomiarów warto przy odłączonym napięciu przez pewien czas zmierzyć temperaturę jako funkcję czasu. Wyniki mogą dać podstawę do oszacować strat w kalorymetrze.

II. 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.

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

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 i 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 na szereg sposobów. Na przykład: dysponując wynikami pomiarów napięcia U na ustalonym oporniku i natężenia I płynącego przez niego prądu, można sprawdzić, czy opornik ten spełnia prawo Ohma, czyli czy napięcie jest proporcjonalne do natężenia.

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 Q/t od natężenia I prądu płynącego przez opornik. Zakładając, że moc cieplna Q/t jest równa mocy elektrycznej $P_k = RI^2$ (przekaz energii bez strat) 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). Jeśli znamy badaną zależność do dobieramy odpowiednie funkcje występujących wielkości. W naszym przypadku najlepiej jest wykreślić zależność mocy cieplnej od kwadratu prądu. Z wcześniejszych założeń wynika, że współczynnik kierunkowy prostej powinien być oporem R .

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

W obu przypadkach interesująca może być zależność mocy „cieplnej” Q/t od mocy „elektrycznej” UI zmierzonych w trakcie doświadczenia i w związku z tym warto wykonać taki wykres. Co powinniśmy otrzymać?

Również powinniśmy wykreślić zależność temperatury od czasu otrzymaną na zakończenie każdej z części doświadczenia.

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 $P_k = I^2 R$ między mocą wydzieloną w kalorymetrze, a opornością 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 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 oporności. W oparciu o wykres należy dokonać analizy 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.
- W konfiguracji z ustaloną opornością spirali ogrzewającej wodę, analizę relacji między mocą wynikającą z pomiarów kalorymetrycznych a mocą z pomiarów elektrycznych wraz z konkluzją, wynikającą z zastosowanej metody analizy danych, o zgodności wyników uzyskanych obiema metodami bądź braku takiej zgodności (równanie 1).
- Graficzne przedstawienie zależności mocy P_k wydzielonej w kalorymetrze od kwadratu natężenia I prądu w obwodzie. Czy otrzymana zależność może być uznana za liniową? Jeśli tak to czy otrzymany współczynnik kierunkowy prostej jest zgodny z wcześniej wyznaczoną szacunkową wartością oporności R . Ze względu na przedstawione wyżej uwagi o niepewnościach pomiarów rozmaitych wielkości, jako konkluzja wystarczy jakościowy komentarz odnośnie zgodności zależności modelowej z danymi.
- W konfiguracji, w której zmieniane są układy spiral ogrzewających wodę, analizę relacji między mocą wynikającą z pomiarów kalorymetrycznych a mocą z pomiarów elektrycznych wraz z konkluzją, wynikającą z zastosowanej metody analizy danych, o zgodności wyników uzyskanych obiema metodami bądź braku takiej zgodności (równanie 1).
- Graficzne przedstawienie zależności mocy P_k wydzielonej w kalorymetrze od oporności R . Rysunek powinien ukazywać punkty pomiarowe wraz z modelową zależność między mocą P_k a natężeniem I prądu: $P_k = I^2 R$, gdzie I jest natężeniem, przy którym wykonywane są pomiary. Ze względu na przedstawione wyżej uwagi o niepewnościach pomiarów, jako konkluzja wystarczy jakościowy komentarz odnośnie zgodności zależności modelowej z danymi.
- Łączną analizę danych z pomiarów kalorymetrycznych i elektrycznych dla obu zbiorów danych: przy ustalonym i zmienianym układzie spiral ogrzewających wodę w kalorymetrze, wraz z konkluzją o zgodności mocy wyznaczanych na dwóch drogach bądź braku takiej zgodności.
- Ustosunkowanie się co do istotności, wraz z uzasadnieniem, obserwowanych fluktuacji napięcia i natężenia prądu, o ile takie były obserwowane.

Istotne, w Twojej 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 Twojej 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 Twoich 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 Twojego 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 do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twojego 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 ogrzewanie 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 64 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 wydzielaną 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 równolegle 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 δt 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 a otaczającą 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 wydzielili 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:

$$dE/dt = -k(T - T_0), \text{ gdzie } k \text{ jest stałą zależną od stygnącego ciała.}$$

Problem 13. Wyznacz zależność czasową temperatury pręta grafitowego podłączonego do stałego napięcia U , jeśli oporność grafitu zależy od temperatury T według prawa $R(T) = R_0/(1 + \alpha(T - T_0))$, gdzie T_0 jest początkową temperaturą pręta. 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 płytką, emitującą 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 płytką 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–Boltzmana, 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–Boltzmana. Stała słoneczna to ilość energii, jaka dociera ze Słońca na Ziemię do jednostki powierzchni na jednostkę czasu.

Opracowanie: NN

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