



Paweł Turkowski
Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

ĆWICZENIE 33

WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI URZĄDZENIA GRZEJNEGO

Kraków 28.06.2019



**Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu
pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni”
o numerze POWR.03.05.00-00-Z20/18**

SPIS TREŚCI

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Definicja współczynnika sprawności
2. Praca stałego prądu elektrycznego
3. Praca prądu zmiennego
4. Wartości skuteczne napięcia i natężenia prądu
5. Watomierz
6. Energia użyteczna, energia dostarczona i sprawność urządzenia grzejnego
7. Przewodnictwo ciepła, konwekcja, promieniowanie cieplne

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

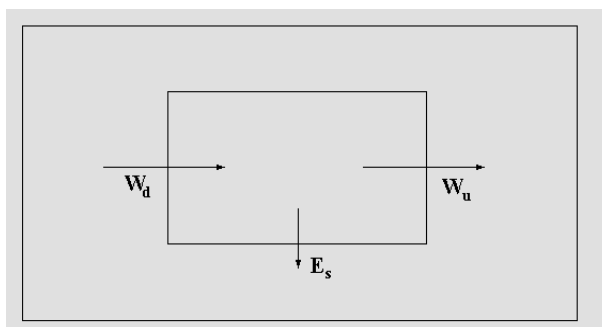
ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

Definicja współczynnika sprawności urządzenia. Prąd stały. Ciepło Joule'a. Prąd zmienny. Praca prądu zmiennego. Wartość skuteczna napięcia i natężenia prądu zmiennego. Sprawność urządzenia grzejnego zasilanego prądem. Straty energii na drodze: przewodnictwa cieplnego, konwekcji i promieniowania. Prawo przewodnictwa cieplnego. Prawo Stefana-Boltzmann.

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Definicja współczynnika sprawności

Współczynnik sprawności to wielkość charakteryzująca dobroć układu, w którym przebiega proces przemiany energii. Rys.1 przedstawia schematycznie pewien układ, w którym przebiega proces przemiany energii W_d do niego dostarczanej w energię użyteczną W_u .



Rys.1. Układ, w którym przebiega proces przemiany energii

W procesie przemiany część energii oznaczona jako E_s jest tracona bezużytecznie. Przez *współczynnik sprawności urządzenia* rozumiemy liczbę bezwymiarową η (czytaj eta) określoną następująco:

$$\eta = \frac{W_u}{W_d} . \quad (1)$$

Ze względu na rozpraszanie energii E_s , współczynnik η jest zawsze mniejszy od jedności lub od 100%, gdy jego wartość podawana jest w procentach:

$$\eta = \frac{W_u}{W_d} = \frac{W_d - E_s}{W_d} = 1 - \frac{E_s}{W_d} < 1 . \quad (2)$$

Im większa wartość współczynnika sprawności, tym straty energii są mniejsze.

Współczynnik sprawności pozwala porównywać funkcjonowanie różnych układów: urządzeń mechanicznych, cieplnych, elektrycznych, elektronicznych, organizmów żywych i innych. Sprawności kilku wybranych urządzeń podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Sprawności wybranych urządzeń

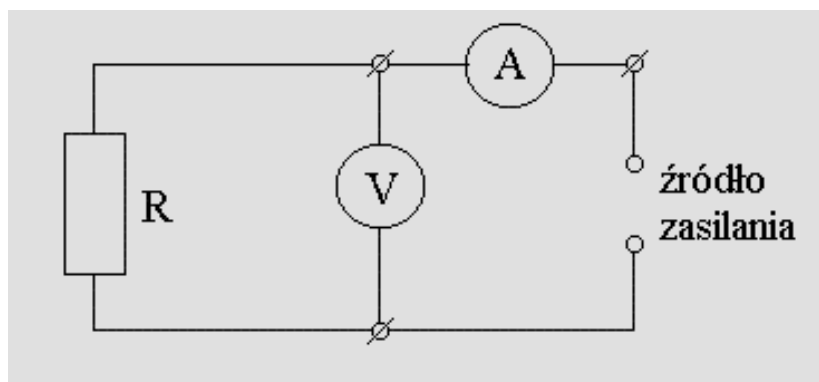
URZĄDZENIE	ogniwo słoneczne	akumulator ołowiowy	garnek bezprzewodowy (1 litr wody ogrzewany od temperatury pokojowej do wrzenia)
η [%]	ok. 10%	70÷80%	ok. 85%
Energia dostarczona	energia niesiona przez światło	elektryczna (ładowanie)	elektryczna
Energia użyteczna	elektryczna	elektryczna (rozładowanie)	ciepło pobrane przez wodę

2. Praca stałego prądu elektrycznego

Z prądem elektrycznym stałym (ang. DC) mamy do czynienia gdy ruch ładunków elektrycznych w obwodzie jest jednokierunkowy, a wartość natężenia prądu I nie zmienia się. Przepływ stałego prądu elektrycznego w obwodzie zamkniętym o niezerowym oporze R wymaga dopływu energii ze źródła zasilania, np. z ogniwa chemicznego lub z zasilacza DC. Ilość tej energii można obliczyć według wzoru na pracę prądu elektrycznego:

$$W = UIt, \quad (3)$$

gdzie W – praca wyrażona w dżulach, U - wartość napięcia zasilania mierzona w woltach, I - wartość natężenia prądu mierzona w amperach, t - czas przepływu prądu mierzony w sekundach. Jeśli w obwodzie nie zachodzi przetwarzanie tej dopływającej energii na pracę mechaniczną, to wydzieli się ona w całości w formie ciepła, tzw. *ciepła Joule'a*.



Rys.2. Układ do pomiaru pracy prądu elektrycznego stałego zawierający woltomierz i amperomierz prądu stałego (DC)

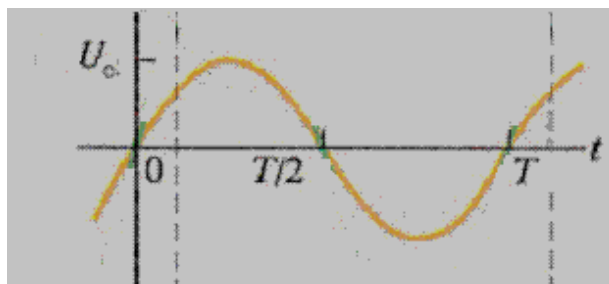
3. Praca prądu zmiennego

Z prądem elektrycznym zmiennym, a dokładniej mówiąc przemiennym (ang. AC), mamy do czynienia, gdy ruch ładunków elektrycznych w obwodzie okresowo zmienia swój kierunek.

Z taką sytuacją spotykamy się korzystając bezpośrednio z sieci prądu o napięciu 230V.

W czasie 1 sekundy zachodzi wówczas 100 zmian kierunku przepływu prądu, czyli 50 pełnych cykli zmian - mówimy, że częstotliwość tych zmian wynosi 50Hz (herców).

Dokładniej mówiąc napięcie $U(t)$ w gniazdku elektrycznym sieci prądu 230V/50Hz zmienia się sinusoidalnie (Rys.3). Ujemna wartość napięcia na tym wykresie oznacza, że wymuszony kierunek przepływu prądu w grzałce lub w żarówce zasilanej tym napięciem jest przeciwny do kierunku w poprzedzającym go półokresie gdy wartości napięć były dodatnie.



Rys.3. Wykres zmian napięcia w gniazdku elektrycznym. Okres zmian $T=1/50$ s, amplituda $U_0 \approx 325$ V, nominalna wartość skuteczna napięcia $U_{SK}=230$ V

Gdy obwód elektryczny zasilamy napięciem sinusoidalnie zmiennym $U(t)=U_0 \sin(\omega t)$ to prąd, który w nim płynie ma natężenie także sinusoidalnie zmienne, ale niekoniecznie zgodne w fazie z napięciem: $I=I_0 \sin(\omega t - \varphi)$. Wzór na pracę prądu elektrycznego wykonaną w czasie t przyjmuje wówczas postać:

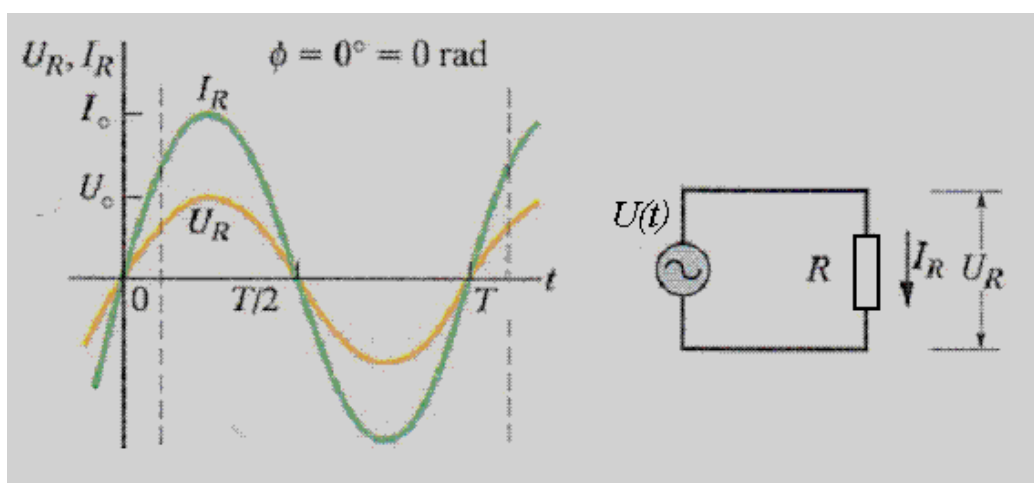
$$W = U_{SK} I_{SK} t \cos(\varphi), \quad (4)$$

gdzie U_{SK} oznacza tzw. wartość skuteczną napięcia, I_{SK} wartość skuteczną natężenia prądu, φ – różnicę faz pomiędzy napięciem i natężeniem prądu.



Ze wzoru (4) wynika, że przepływ prądu zmiennego przez pewien element elektroniczny, dla przykładu przez głośnik, niekoniecznie związany jest z wydzielaniem ciepła o ile przesunięcie fazowe ϕ zbliżone jest do 90° . Jednak w grzałce elektrycznej lub w spirali grzejnej zasilanej prądem zmiennym 50Hz zmiany napięcia i natężenia prądu są zgodne w fazie ($\phi=0^\circ$, patrz Rys.4) i wzór na pracę prądu elektrycznego upraszcza się do postaci:

$$W = U_{SK} I_{SK} t . \quad (5)$$



Rys.4. Napięcie i natężenie prądu płynącego przez grzałkę elektryczną o oporze R

Gdy napięcie i natężenie prądu zmiennego w obwodzie są zgodne w fazie ($\phi=0^\circ$) do pomiaru pracy prądu stosować można układ przedstawiony na Rys.2 z tą różnicą, że tym razem woltomierz i amperomierz są miernikami prądu zmiennego (AC).

4. Wartości skuteczne napięcia i natężenia prądu

4a. Pojęcie wartości skutecznej

Jak widać na rysunku 3 chwilowe wartości iloczynu napięcia i natężenia prądu $U(t) \cdot I(t)$ przyjmują różne wartości. Chwilami ich iloczyn jest nawet równy zero, gdy U lub I są równe zero. Oznacza to, że w krótkich przedziałach czasu grzałka grzeje się mniej lub bardziej intensywnie, chwilami moc wydzielona na niej spada do zera, by następnie znów wzrastać. W ciągu jednego okresu T lub wielokrotności okresów zmiany te ulegają uśrednieniu i w rezultacie moc wydzielająca się na grzałce jest taka, jak gdyby grzałka była zasilana napięciem stałym, które nazywamy napięciem skutecznym i oznaczamy przez U_{SK} . W polskiej sieci niskiego napięcia obowiązuje norma, według której napięcie skuteczne powinno być równe 230V. Napięcie to podlega jednak pewnym wahaniom podobnie jak skuteczne natężenie prądu I_{SK} . Jest ono z kolei natężeniem prądu stałego, które w ciągu jednego okresu T lub wielokrotności okresów wydzieliłoby na grzałce moc taką, jaką wydziela rozważany prąd zmienny.

Ogólnie dostępne amperomierze i woltomierze prądu zmiennego (ustawione na zakresy AC) wskazują właśnie wartość skuteczną prądu i napięcia pod warunkiem, że jest ono sinusoidalnie zmienne, a częstotliwość prądu zbliżona jest do 50 Hz. Wartość skuteczną napięcia i natężenia odczytać można wtedy bezpośrednio na skali przyrządów bez dokonywania jakichkolwiek przeliczeń. Jeśli chcemy zmierzyć wartość skuteczną napięcia o innym niż sinusoidalny kształcie i o innej częstotliwości należy sprawdzić w instrukcji przyrządu czy posiadany przez nas woltomierz do tego się nadaje.

4b. Związek wartości skutecznej z amplitudą

Wartości skutecznych nie należy mylić z amplitudami U_0 , I_0 . Amplitudy są zazwyczaj większe od wartości skutecznych a tylko w szczególnych przypadkach mogą być im równe. Do ogólnych wzorów na obliczenie wartości skutecznej napięcia i natężenia prądu zmiennego oraz ich związku z amplitudami dochodzi się odpowiadając na pytanie "jakie napięcie U_{SK} i jakie natężenie I_{SK} musiałby mieć prąd stały, aby w ciągu tego samego czasu wydzielić taką samą ilość energii, jak prąd okresowo zmienny o okresie T ". Rozumowanie to prowadzi do następujących równań na wydzieloną moc P w okresie T . Zgodnie z równaniem (5) moc P wydzielana na spełniającym prawo Ohma oporniku o wartości oporu R wynosi:

$$P = W / t = U_{SK} I_{SK} = \frac{U_{SK}^2}{R} = I_{SK}^2 R . \quad (6)$$

Podobnie pracę dW prądu zmiennego w krótkich przedziałach czasu dt możemy obliczać korzystając ze wzorów wynikających z (5) oraz z prawa Ohma:

$$dW = U(t)I(t) dt = \frac{U^2(t)}{R} dt = I^2(t) \cdot R dt \quad (7)$$

Porównanie (6) i (7) dla jednego okresu T prowadzi do równań całkowych na wartości skuteczne napięcia oraz natężenia prądu zmiennego:

$$P = \frac{U_{SK}^2}{R} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U^2(t)}{R} dt \quad (8)$$

oraz

$$P = I_{SK}^2 \cdot R = \frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) \cdot R \cdot dt . \quad (9)$$

Dla najczęściej spotykanego prądu sinusoidalnie zmiennego

$$\int_0^T U_0^2 \sin^2(\omega t) \cdot dt = \frac{1}{2} U_0^2 \cdot T, \quad \int_0^T I_0^2 \sin^2(\omega t) \cdot dt = \frac{1}{2} I_0^2 \cdot T. \quad (10)$$

Korzystając ze wzorów (8), (9) i (10) otrzymujemy wyniki $U_{SK}=U_0/\sqrt{2}$, $I_{SK}= I_0/\sqrt{2}$, gdzie: U_0 i I_0 są amplitudami napięcia U i natężenia I tego prądu sinusoidalnie zmiennego. Zatem amplituda napięcia sieciowego U_0 sięga wartości $\sqrt{2} \cdot 230V \approx 325V$.



5. Watomierz

Problem poprawnego pomiaru pracy prądu elektrycznego zmiennego płynącego przez dany obwód elektryczny upraszcza się radykalnie gdy zamiast woltomierza i amperomierza prądu zmiennego użyjemy urządzenia zwanego watomierzem, czyli miernika mocy elektrycznej.



Rys. 5. Pomiar mocy lampy biurkowej za pomocą watomierza

Nie musimy wówczas mierzyć oddzielnie wartości skutecznych napięcia i natężenia prądu oraz uwzględniać przesunięcia fazowego pomiędzy tymi wielkościami, ponieważ watomierz mierzy wartość iloczynu $U_{sk}I_{sk} \cos(\varphi)$, czyli moc czynną prądu P . Wzór na pracę prądu elektrycznego wykonaną w czasie t przyjmuje zatem prostą postać:

$$W = P \cdot t \quad (11)$$

gdzie P oznacza zmierzoną moc czynną, t - czas przepływu prądu. Watomierze cyfrowe umożliwiają także pomiar pracy prądu elektrycznego (wyrażają ją zwykle w kWh a nie w J) a nawet koszt zużytej energii.

6. Energia użyteczna, energia dostarczona i sprawność urządzenia grzejnego

W ćwiczeniu mamy do czynienia z elementem grzejnym, do którego dostarczamy energię elektryczną W_d w ilości danej wzorem (11). Energią użyteczną W_u jest ta część energii doprowadzonej, która została zużyta wyłącznie na ogrzanie wody. Wobec powyższego energię użyteczną W_u można obliczyć ze wzoru:

$$W_u = mc(T_k - T_p), \quad (12)$$

gdzie: m - masa wody ogrzewanej (wyrażona w kg), c - ciepło właściwe wody ($c=4190$ J/kg°C), T_k - temperatura końcowa wody, T_p - jej temperatura początkowa.

W przypadku rozpatrywanego urządzenia grzejnego współczynnik sprawności jest zatem równy:

$$\eta = \frac{mc(T_k - T_p)}{P \cdot t}. \quad (13)$$

Na wartość współczynnika sprawności wpływa energia stracona bezużytecznie, czyli energia zużyta na ogrzanie garnka, przedmiotów i powietrza w otoczeniu garnka i grzałki oraz przewodów doprowadzających energię. Jeśli zamierzamy przeanalizować możliwość poprawy sprawności urządzenia, to należy starannie zbadać jakimi drogami energia do niego dostarczana jest bezużytecznie rozpraszana.

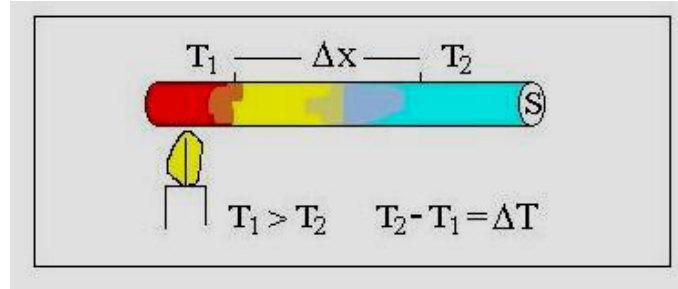


7. Przewodnictwo ciepła, konwekcja, promieniowanie cieplne

Możemy wyróżnić trzy sposoby przekazywania energii na sposób ciepła: przewodnictwo ciepła, konwekcję oraz promieniowanie.

7a. Przewodnictwo ciepła

Przewodzenie ciepła to wymiana energii pomiędzy cząstkami o wyższej energii oraz, sąsiadującymi z nimi cząstkami o energii niższej jako wynik oddziaływania pomiędzy nimi. Przewodzenie ciepła zachodzi zarówno w gazach, cieczach, jak i ciałach stałych i odbywa się bez przenoszenia masy. W płynach jest spowodowane zderzeniami i dyfuzją molekuł podczas ich chaotycznego ruchu, natomiast w ciałach stałych zachodzi na drodze drgań cząsteczek oraz transportu energii poprzez elektrony swobodne.



Rys.6. Przewodzenie ciepła

Rozważmy (Rys.6) dwie równoległe powierzchnie S ciała stałego, odległe od siebie o Δx , charakteryzujące się różnymi temperaturami T_2 i T_1 przy czym $T_2 < T_1$. Spadek temperatury na odcinku Δx jest równy: $-\Delta T = -(T_2 - T_1)$, gdzie znak minus oznacza zmniejszanie się temperatury wraz ze wzrostem współrzędnej x . Wówczas przez powierzchnię S w ciągu czasu t przepływie pewna ilość energii w postaci ciepła Q . Szybkość przewodzenia ciepła opisana jest prawem *przewodnictwa cieplnego* (prawo Fouriera), zgodnie z którym:

$$\frac{Q}{t} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{x} S, \quad (14)$$

gdzie Q/t oznacza *szybkość przekazu ciepła* (ilość energii przekazywanej w ciągu jednej sekundy), λ - *współczynnik przewodnictwa cieplnego* zależny od rodzaju materiału, S - pole powierzchni warstwy izolującej, x - jej grubość. Znak minus jest związany z tym, że ciepło jest przekazywane od ciała o temperaturze wyższej do ciała o temperaturze niższej, czyli w kierunku rosnących wartości x gdy temperatura wraz ze wzrostem x maleje.

Przewodność cieplna λ , inaczej współczynnik przewodnictwa ciepła, określa zdolność substancji do przewodzenia ciepła. W tych samych warunkach więcej ciepła przepłynie przez materiał o większym współczynniku przewodności cieplnej, jest on więc wielkością charakterystyczną dla materiału. Dla małych różnic i zakresów temperatur w technice przyjmuje się, że przewodność cieplna nie zależy od temperatury.

W naszym ćwiczeniu energia wydzielona w spirali grzejnej w pierwszym rzędzie prowadzi do wzrostu temperatury spirali, aż do momentu gdy ilość dostarczanej w ciągu 1s energii elektrycznej zrówna się z ilością energii przez nią oddawanej. Temperatura spirali jest stosunkowo wysoka, a zatem musi być ona umieszczona w ceramicznej osłonie. Zgodnie z prawem przewodnictwa cieplnego woda pobiera energię na drodze przewodnictwa poprzez tę warstwę izolacyjną tym szybciej, im większa jest różnica temperatur wody T_w i spirali T_s . Na drodze przewodnictwa, ciepło dociera także do obudowy garnka podwyższając jego temperaturę.



7b. Konwekcja

Ruch konwekcyjny ma związek z zależnością gęstości płynu od jego temperatury. Ogrzany płyn (ciecz lub gaz) unosi się do góry ustępując miejsca zimnemu, który napływa na jego miejsce. W tym procesie transport energii odbywa się wraz z przenoszeniem masy.

W naszym ćwiczeniu ten sposób przekazu energii jest obecny, ponieważ powietrze znajdujące się w pobliżu garnka jest ogrzewane i unosi się do góry, ustępując miejsca zimnemu, które napływa na jego miejsce.

7c. Promieniowanie ciepłe (termiczne)

Promieniowanie ciepłe to energia wyemitowana przez materię w formie fal elektromagnetycznych. Inaczej niż przy przewodzeniu czy konwekcji ten sposób wymiany ciepła nie wymaga żadnego ośrodka np. w ten sposób do Ziemi dociera energia słoneczna poprzez kosmiczną próżnię. Wszystkie ciała o temperaturze powyżej zera absolutnego, emitują promieniowanie termiczne, czyli falę elektromagnetyczną należącą do zakresu podczerwieni, a przy temperaturach wyższych od 800°C także i światło widzialne.

Ilość energii wypromieniowanej w ciągu jednej sekundy E zależy od temperatury bezwzględnej T ciała, od wielkości promieniującej powierzchni S i od jej rodzaju. Ocenic ją można posługując się *prawem Stefana-Boltzmann*

$$E = kS\sigma T^4, \quad (15)$$

gdzie: σ - stała Stefana-Boltzmann; współczynnik absorpcji k zależy od rodzaju powierzchni. Najgorzej promieniają powierzchnie lustrzane (mała wartość k) i dlatego powierzchnię kalorymetrów, naczyń kuchennych i innych pokrywa się lśniąca metaliczną warstwą.

W naszym ćwiczeniu umieszczenie garnka w próżniowej osłonie obniży straty na drodze przewodnictwa cieplnego i konwekcji, natomiast nie zapobiegnie promieniowaniu ciepła, które zachodzi także w próżni.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

Encyklopedia Fizyki, Tom 3, PWN, Warszawa 1974, s.426.

Horowitz P., Hill W., Sztuka elektroniki T2, WKŁ, Warszawa 1996, s.507.

Piech T., Fizyka dla II klasy liceum ogólnokształcącego, technikum i liceum zawodowego.
Wyd.V. PZWS, Warszawa 1973, s.152-154.

Sawicki M., (red.). Nauczanie fizyki. Część II. Podręcznik dla nauczycieli fizyki klasy II
liceum ogólnokształcącego i technikum. WSiP, Warszawa 1978, s.169-173.

Sawicki M., (red.). Nauczanie fizyki. Część III. Podręcznik dla nauczycieli fizyki klasy III
liceum ogólnokształcącego i technikum. Warszawa 1979. WSiP. s.133-136.

Wikipedia. Hasła: „Prawo Joule’a”, „Praca prądu elektrycznego”, „Watomierz”

Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” o numerze POWR.03.05.00-00-Z020/18

33 WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI URZĄDZENIA GRZEJNEGO

Zasada pomiaru

Przez *współczynnik sprawności* η urządzenia rozumiemy liczbę bezwymiarową określoną następująco:

$$\eta = \frac{W_u}{W_d}$$

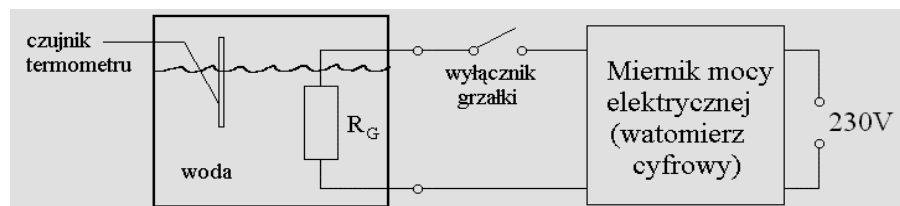
gdzie W_d oznacza energię do niego dostarczoną a W_u energię użyteczną. Elementem, do którego dostarczamy energię wykonując ćwiczenie jest spirala grzejna, a energią użyteczną jest ta część energii doprowadzonej, która została zużyta na ogrzanie wody tą spiralą.

II. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie sprawności urządzeń grzejnych.

III. WYKONANIE ĆWICZENIA. POMIAR PIERWSZY

1. W ćwiczeniu korzystamy z układu doświadczalnego przedstawionego na Rys. R_G oznacza opór spirali grzejnej turystycznego garnka elektrycznego lub opór grzałki.



Rys. Obwód pomiarowy do wyznaczenia sprawności urządzenia grzejnego

2. Odmierzyć naczyniem cylindrycznym miarowym $V = 1000\text{cm}^3$ (tzn. $0,001\text{m}^3$) wody destylowanej i włąć do garnka elektrycznego. Zanotować maksymalną niepewność pomiarową $\Delta_d V$.
3. Odczytać temperaturę początkową wody T_p , zanotować maksymalną niepewność pomiaru $\Delta_d T_p$.
4. Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego ćwiczenia, włączyć zasilanie garnka jednocześnie włączając stoper. (Wyłącznik grzałki w pozycji „1”).
5. Zanotować wartość mocy grzałki garnka elektrycznego P_l mierzoną przez watomierz. Mierzona moc podlega fluktuacjom w granicach kilku watów, dlatego proponujemy zanotować jej dwie wartości skrajne (P_{max} i P_{min}) i jako P_l przyjąć ich średnią arytmetyczną.
6. Wyłączyć zasilanie gdy temperatura w garnku osiągnie 70°C i jednocześnie wyłączyć stoper. Zanotować czas wyłączenia t oraz niepewność pomiaru czasu stoperem $\Delta_d t$ oraz niepewność refleksu eksperymentatora $\Delta_e t$. Obserwować jeszcze przez kilka minut termometr mierzący temperaturę wody w naczyniu i zanotować jej wartość maksymalną T_k . Przyjąć $\Delta_d T_k = \Delta_d T_p$.
7. Odłączyć garnek elektryczny od obwodu. Nie wylewać z niego wody.



POMIAR DRUGI

8. Do naczynia wlać $V=1000\text{ cm}^3$ wody. Zanotować maksymalną niepewność pomiarową $\Delta_d V$.
9. Umieścić termometr, mieszkadło elektryczne (R2-CAT) i grzałkę (tzw. nurkową) w naczyniu z wodą. W tym celu należy odkręcić nieco nakrętkę motylkową śruby po lewej stronie statywu i obniżyć położenie tych urządzeń oraz zablokować śrubę.
10. Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego ćwiczenia włączyć mieszkadło oraz wtyczkę grzałki umieszczanej w naczyniu metalowym.
11. Włączyć termometr Voltcraft DT-300. Po upływie około dwu do trzech minut odczytać temperaturę początkową wody T_p oraz zanotować niepewność pomiaru $\Delta_d T_p$.
12. Włączyć zasilanie grzałki wraz ze stoperem. (Wyłącznik w pozycji „1”).
13. Zanotować wartość mocy grzałki P_2 mierzona przez watomierz. Mierzona moc podlega fluktuacjom w granicach kilku watów, dlatego proponujemy zanotować jej dwie wartości skrajne (P_{max} i P_{min}) i jako P_2 przyjąć ich średnią arytmetyczną.
14. Wyłączyć zasilanie gdy temperatura w naczyniu osiągnie 70°C notując czas wyłączenia t . Po kilkuminutowej obserwacji wskazań termometru zanotować temperaturę maksymalną T_k . Termometr Voltcraft DT-300 zapamiętuje temperaturę maksymalną T_k (przycisk „MAX”).
15. Wyłączyć mieszkadło. Wyłączyć termometr. Wyjąć wtyczkę grzałki z gniazda.

IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Obliczyć masę $m[\text{kg}]$ wody w garnku elektrycznym oraz w naczyniu z grzałką według wzoru: $m=\rho V$ (gęstość wody ρ dla temperatury początkowej odczytać z poniżej zamieszczonej tabeli).

T[°C]	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\rho[\text{kg/m}^3]$	998,62	998,43	998,23	998,02	997,80	997,56	997,32	997,07	996,81	996,54

2. Obliczyć współczynnik sprawności η_1 garnka elektrycznego oraz współczynnik sprawności η_2 grzałki elektrycznej w naczyniu metalowym korzystając ze wzoru:
$$\eta = \frac{mc(T_k - T_p)}{Pt}$$

gdzie: m - masa wody ogrzewanej spiralą grzejną (wyrażona w kg), c - ciepło właściwe wody ($c=4190\text{ J/kg}^\circ\text{C}$), T_k - temperatura końcowa wody, T_p - temperatura początkowa wody, P - wartość mocy grzałki, t - czas przepływu prądu.

3. Wykonać rachunek na jednostkach by sprawdzić, że współczynnik sprawności jest bezwymiarowy.
4. Dla jednego z dwu pomiarów współczynnika sprawności obliczyć niepewności standardowe typu B pomiaru wielkości m , $(T_k - T_p)$, P , t .

$$u(m) = \rho \frac{\Delta_d V}{\sqrt{3}}, \quad u(T_k - T_p) = \sqrt{\frac{(\Delta_d T_k)^2}{3} + \frac{(\Delta_d T_p)^2}{3}}, \quad u(P) = \frac{\Delta_d P}{\sqrt{3}}, \quad u(t) = \sqrt{\frac{(\Delta_d t)^2}{3} + \frac{(\Delta_e t)^2}{3}}.$$

Niepewność $\Delta_d V$ należy wyrazić w m^3 , by po pomnożeniu przez $\rho [\text{kg/m}^3]$ otrzymać $u(m) [\text{kg}]$. Jako niepewność aparaturową $\Delta_d P$ przyjąć 1% wartości zmierzonej.

5. Obliczyć niepewność standardową $u(\eta)$ pomiaru współczynnika η jako funkcji czterech zmiennych m , $(T_k - T_p)$, P , t zgodnie ze wzorem (12)* lub wzorem (9)*.

Wzory (*) patrz K. Rębilas „Wprowadzenie do metod opracowania wyników pomiarowych”.

6. Obliczyć niepewność rozszerzoną $U(\eta)=k \cdot u$, przyjmując $k=2$.
7. Zapisać wynik końcowy η wraz z niepewnością rozszerzoną dokonując odpowiedniego zaokrąglenia.