

# ĆWICZENIE 33

## WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI URZĄDZENIA GRZEJNEGO

Kraków 08.03.2016

### SPIS TREŚCI

#### CZEŚĆ TEORETYCZNA

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

#### LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

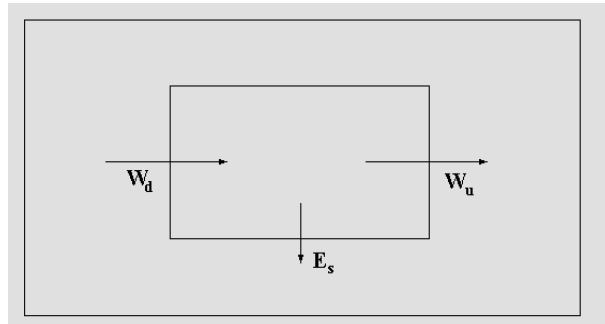
#### ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

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.

# I. 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  $\eta$  (czytaj eta) określoną następująco:

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

Ze względu na rozpraszanie energii  $E_s$ , współczynnik  $\eta$  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)
$\eta$ [%]	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:

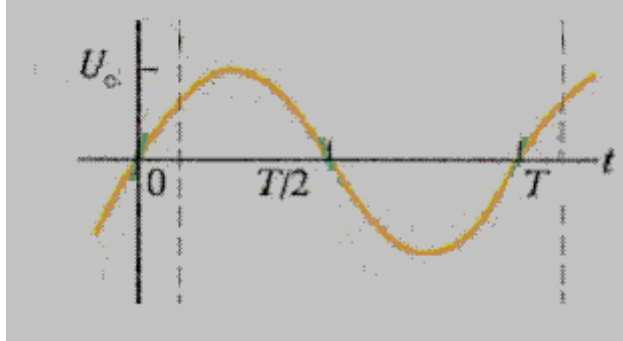
$$W = UI t, \quad (3)$$

gdzie  $W$  – praca wyrażona w dżulach,  $U$  - wartość napięcia zasilania mierzona w voltach,  $I$  - 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*.

## 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.2). 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.2. 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

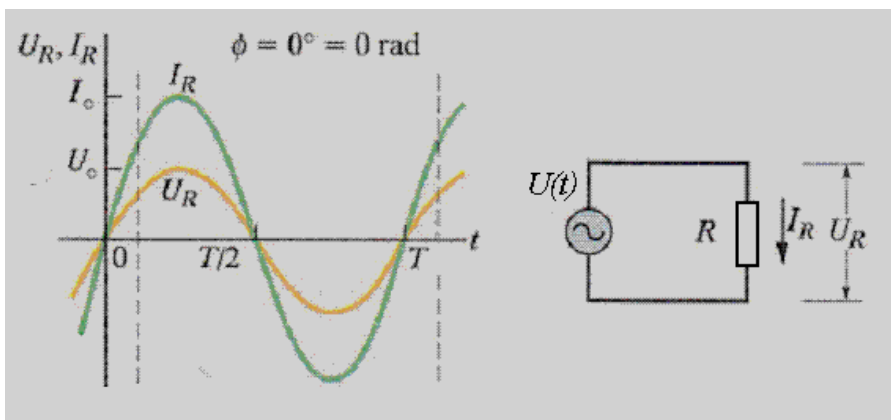
Gdy obwód elektryczny zasilamy napięciem sinusoidalnie zmiennym  $U(t)=U_0 \sin(\omega t)$  to prąd, który w nim płynie ma natężenie także sinusoidalnie zmienne, ale niekoniecznie zgodne w fazie z napięciem:  $I=I_0 \sin(\omega t - \varphi)$ . Wzór na pracę prądu elektrycznego wykonaną w czasie  $t$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

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  $\varphi$  zbliżone jest do  $90^\circ$ . Jednak w grzałce elektrycznej lub w spirali grzejnej zasilanej prądem zmiennym 50Hz zmiany napięcia i natężenia prądu są zgodne w fazie ( $\varphi=0^\circ$ , patrz Rys.3) i wzór na pracę prądu elektrycznego upraszcza się do postaci:

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



Rys.3. Napięcie i natężenie prądu płynącego przez grzałkę elektryczną o oporze R

#### 4. Wartości skuteczne napięcia i natężenia prądu

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 pewnym wahaniom i w ćwiczeniu jest ono mierzone. Jednocześnie pomiarowi podlega także skuteczne natężenie prądu  $I_{SK}$ . Jest ono z kolei natężeniem prądu stałego, które w ciągu jednego okresu  $T$  lub wielokrotności okresów wydzieliliby 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.

Wartości skutecznych nie należy mylić z amplitudami  $U_0$ ,  $I_0$ . 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 sięga  $U_0 = \sqrt{2} \cdot 230V \approx 325V$ .

## 5. 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 (5). 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:

$$W_u = mc(T_k - T_p), \quad (11)$$

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:

$$\eta = \frac{mc(T_k - T_p)}{U I t}. \quad (12)$$

W powyższym wzorze dla przejrzystości pominięto indeksy "sk" zakładając, że wiadomo iż chodzi o wartość skuteczną napięcia i natężenia prądu.

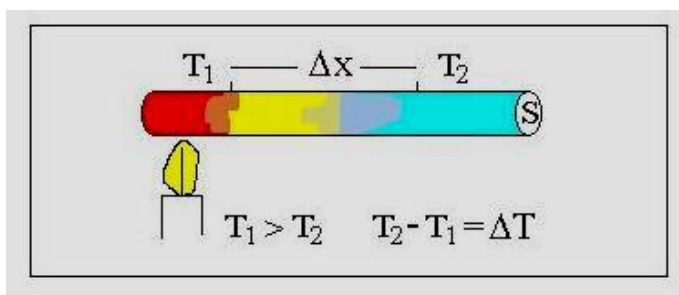
Na wartość współczynnika sprawności wpływa energia stracona bezużytecznie, czyli energia zużyta na ogrzanie garnka, powietrza w otoczeniu garnka i grzałki oraz przewodów doprowadzających energię. Jeśli zamierzamy przeanalizować możliwość poprawy sprawności urządzenia, to należy starannie zbadać jakimi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

## 6. Przewodnictwo ciepła, konwekcja, promieniowanie cieplne

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

## 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, cieczech, 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.4. Przewodzenie ciepła

Rozważmy (Rys.4) dwie równoległe powierzchnie  $S$  ciała stałego, odległe od siebie o  $\Delta x$ , charakteryzujące się różnymi temperaturami  $T_2$  i  $T_1$  przy czym  $T_2 < T_1$ . Spadek temperatury na odcinku  $\Delta x$  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:

$$\frac{Q}{t} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{x} S, \quad (13)$$

gdzie  $Q/t$  oznacza *szybkość przekazu ciepła* (ilość energii przekazywanej w ciągu jednej sekundy),  $\lambda$  - *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  $\lambda$ , 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.

## **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.

## **Promieniowanie cieplne (termiczne)**

Promieniowanie cieplne 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  $800^{\circ}\text{C}$  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*

$$E = kS\sigma T^4, \quad (14)$$

gdzie:  $\sigma$  - stała Stefana-Boltzmann; współczynnik absorpcji  $k$  zależy od rodzaju powierzchni. Najgorzej promieniują 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

Chyla K., Fizyka dla ZSZ, Wydanie trzecie, WSziP, Warszawa 1991. s.154-156.

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

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

Jaworski B.M., Piński A.A., Elementy fizyki, T1. PWN, Warszawa 1977.

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.

Skorko M., Podręcznik dla studentów wyższych technicznych studiów zawodowych dla pracujących, Fizyka, PWN, Warszawa 1973. s.473.

# 33 WYZNACZANIE SPRAWNOŚCI URZĄDZENIA GRZEJNEGO

## Zasada pomiaru

Przez *współczynnik sprawności*  $\eta$  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 wyłącznie na ogrzanie wody tą spiralą. W przypadku rozpatrywanego układu współczynnik sprawności urządzenia grzejnego jest zatem równy:

$$\eta = \frac{mc(T_k - T_p)}{UIt}$$

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,  $U$  - wartość skuteczna napięcia zasilania,  $I$  - wartość skuteczna natężenia prądu,  $t$  - czas przepływu prądu.

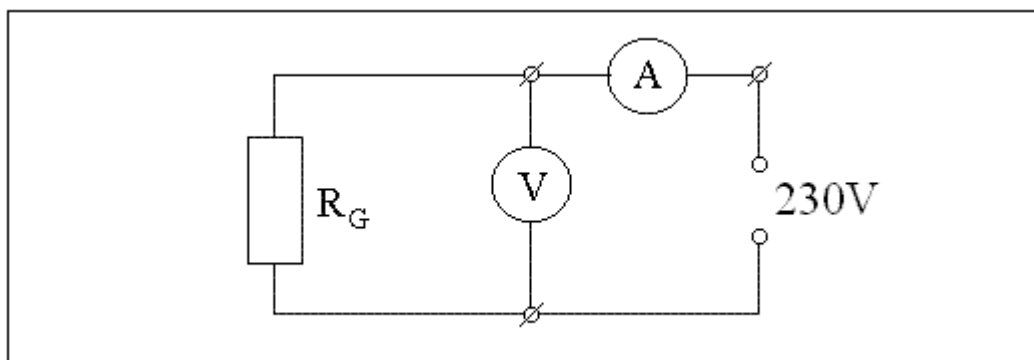
## CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie sprawności urządzeń grzejnych.

## WYKONANIE ĆWICZENIA

### POMIAR PIERWSZY

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



Rys. Obwód pomiarowy do wyznaczenia sprawności urządzenia grzejnego.

- Odmierzyć naczyniem cylindrycznym miarowym  $V = 1000 \text{ cm}^3$  ( $1000 \text{ cm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$ ) wody destylowanej i wlać do garnka. Zanotować maksymalną niepewność pomiarową  $\Delta_d V$ .
- Odczytać temperaturę początkową wody  $T_p$ , zanotować maksymalną niepewność pomiaru  $\Delta_d T_p$ .
- Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego ćwiczenia, włączyć zasilanie garnka jednocześnie włączając stoper. (Włączenie prądu jest możliwe dopiero po zamknięciu przezroczystej plastikowej osłony chroniącej przed przypadkowym dotknięciem zacisków laboratoryjnych, gdy pozostają one pod napięciem 230V).
- Zanotować wartość napięcia  $U$  i natężenia prądu  $I$ . Odczytu na amperomierzu dokonujemy ze skali odnoszącej się do zakresu 5A. Zanotować niepewności pomiarowe  $\Delta_d U$  i  $\Delta_d I$ . Przyjmujemy, że podobnie jak  $\Delta_d T_p$  oraz  $\Delta_d t$  są one równe wartości najmniejszej działki przyrządów.
- Wyłączyć zasilanie gdy temperatura w garnku osiągnie około  $60^\circ\text{C}$  i jednocześnie wyłączyć stoper. Zanotować czas wyłączenia  $t$  oraz niepewność pomiaru czasu stoperem  $\Delta_d t$  oraz niepewność reflexu eksperymentatora  $\Delta_c t$ . Obserwować jeszcze przez kilkanaście minut termometr mierzący temperaturę wody w naczyniu i zanotować jej wartość maksymalną  $T_k$ . Maksymalna niepewność pomiarowa temperatury  $\Delta_d T_k$  jest taka sama jak  $\Delta_d T_p$ .

## POMIAR DRUGI

- Do naczynia z grzałką wlać  $V = 500 \text{ cm}^3$  wody. Zanotować maksymalną niepewność pomiarową  $\Delta_d V$ . Umieścić termometr w metalowym naczyniu z wodą możliwie daleko od grzałki i odczytać temperaturę początkową wody  $T_p$ . Zanotować niepewność pomiaru  $\Delta_d T_p$ .
- W miejsce wtyczki garnka elektrycznego włączyć wtyczkę grzałki umieszczonej w naczyniu.
- Po sprawdzeniu obwodu przez prowadzącego ćwiczenia, włączyć zasilanie wraz ze stoperem.
- Zanotować wartości napięcia  $U$  i natężenia prądu  $I$  oraz ich niepewności pomiarowe  $\Delta_d U$  i  $\Delta_d I$ .
- Wyłączyć zasilanie gdy temperatura w naczyniu osiągnie  $70^\circ\text{C}$  notując czas wyłączenia  $t$ . Po kilkuminutowej obserwacji wskazań termometru zanotować temperaturę maksymalną  $T_k$ .

## OPRACOWANIE WYNIKÓW

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

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

- Obliczyć współczynnik sprawności  $\eta_1$  garnka elektrycznego oraz współczynnik sprawności  $\eta_2$  grzałki elektrycznej w naczyniu metalowym korzystając ze wzoru:  $\eta = \frac{mc(T_k - T_p)}{UIt}$
- Wykonać rachunek na jednostkach by sprawdzić, że współczynnik sprawności jest bezwymiarowy.
- Dla jednego z dwu pomiarów współczynnika sprawności obliczyć niepewności standardowe typu B pomiaru wielkości  $m$ ,  $(T_k - T_p)$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $t$ .

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

Niepewność  $\Delta_d V$  należy wyrazić w  $\text{m}^3$ , by po pomnożeniu przez  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] otrzymać  $u(m)$  [kg].

- Obliczyć niepewność standardową  $u(\eta)$  pomiaru współczynnika  $\eta$  jako funkcji pięciu zmiennych  $m$ ,  $(T_k - T_p)$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $t$  zgodnie ze wzorem (12)\* lub wzorem (9)\*.
- Obliczyć niepewność rozszerzoną  $U(\eta) = k \cdot u$ , przyjmując  $k=2$ .
- Zapisać wynik końcowy  $\eta$  wraz z niepewnością rozszerzoną dokonując odpowiedniego zaokrąglenia.

Wzory ( ) \* patrz „Wprowadzenie do metod opracowywania wyników pomiarowych”.