

Opracowanie koncepcji stanowiska kontrolno-badawczego do wyznaczenia charakterystyk lamp wolframowych

1. Wstęp

Nowoczesne systemy grzewcze coraz częściej wykorzystują ogrzewanie promieniowaniem elektromagnetycznym w zakresie podczerwieni. Źródłem takiego promieniowania są najczęściej grzałki niskotemperaturowe z wykorzystaniem drutu oporowego, pracujące w zakresie promieniowania długofalowego (daleka podczerwień) oraz wysokotemperaturowe lampy halogenowe wykorzystujące żarnik wolframowy i pracujące w zakresie promieniowania średnio i krótkofalowego (bliska podczerwień). Ostatnio pojawiły się lampy wykorzystujące włókno węglowe do wytwarzania średniofalowego promieniowania ciepłego.

Od dawna znane są grzejniki elektryczne służące do podgrzewania małych pomieszczeń a szczególnie przenośne nagrzewnice z nadmuchem powietrznym. Są mobilne i niekłopotliwe w zastosowaniu. Wykorzystują one daleką podczerwień (stosunkowo niska temperatura grzejnika) i działają raczej na zasadzie konwekcyjnego ogrzewania powietrza, które rozchodzi się grawitacyjnie lub jest nadmuchiwane. To raczej ogranicza obszar zastosowania takich grzejników ze względu na straty ciepła (niska sprawność ogrzewania) przy znacznych kosztach energii elektrycznej. Istnieje obszar zastosowań, w którym tradycyjne metody ogrzewania (gazowe, elektryczne niskotemperaturowe) nie zdają egzaminu ze względu na małą skuteczność ogrzewania, duże koszty energii w przypadku ciągłego ogrzewania konwekcyjnego. Tym obszarem są obiekty wielko kubaturowe jak hale, magazyny, kościoły a także miejsca na otwartym terenie, które dotychczas w ogóle nie miały szans na ogrzanie. Jest nim też obszar zastosowań przemysłowych ze szczególnym uwzględnieniem suszarnictwa i lakiernictwa. Przekroczenie tej bariery stało się możliwe dzięki rozwojowi technologicznemu nowoczesnych źródeł grzewczych w postaci wysokotemperaturowych lamp kwarcowo-halogenowych z włóknem wolframowym i ostatnio średniotemperaturowych lamp z włóknem węglowym. Lampy te umożliwiają wytworzenie tzw. krótkofalowego lub średniofalowego elektromagnetycznego promieniowania podczerwonego które można ukształtować w odpowiednią wiązkę przestrzenną za pomocą reflektorów i przesłać w sposób praktycznie bezstratny dożądanego miejsca określonej powierzchni. Tam energia promieniowania jest absorbowana przez powierzchnię i przedmioty znajdujące się na niej. Wskutek tej absorpcji temperatura powierzchni i przedmiotów podnosi się, następuje ich tzw. ogrzanie. Charakterystyczne jest to, że ogrzewanie zachodzi niezależnie od temperatury otoczenia jaka występuje w danym obszarze.

Jest możliwe np. ogrzanie grupy osób na wolnym powietrzu przy temperaturze otoczenia - 20 °C (lub dowolnie niższej). Wynika to z faktu absorpcji energii promieniowania elektromagnetycznego, padającego na określony przedmiot o określonym współczynniku absorpcji. Ta cecha łatwego ukierunkowania promieniowania cieplnego (elektromagnetycznego), jego bezstratnego przesyłania w określone miejsce powierzchni, łatwość jego wytworzenia i co najważniejsze z punktu widzenia ekonomii użytkowania, jego natychmiastowe załączanie i wyłączenie w dowolnie wybranej chwili czy też określonej sekwencji sterowania czasowego, czyni ten sposób ogrzewania bardzo atrakcyjnym szczególnie tam, gdzie inne systemy grzewcze zawodzą. Te cechy łatwości ukształtowania pożądanej wiązki strumienia cieplnego, natychmiastowego załączania i wyłączenia procesu nagrzewania powoduje, że ten system wykorzystywany jest coraz powszechniej nie tylko do ogrzewania budynków, hal, kościołów, wybranych stref na wolnym powietrzu ale też w różnych procesach technologicznych, wymagających precyzyjnego nagrzewania określonych powierzchni w określonym czasie np. różnego rodzaju lakiernie, także samochodowe, lutowanie i rozlutowanie elementów SMD na płytkach drukowanych w przemyśle elektronicznym itp. Jak już wspomniano, przedmioty absorbują energię promieniowania elektromagnetycznego w stopniu zależnym od współczynnika absorpcji dla danej długości fali nagrzewanego przedmiotu. Z drugiej strony wartość tego współczynnika zależy może (i na ogół zależy) od długości fali tego promieniowania. I chociaż lampa grzejnika generuje widmo ciągłe tzn. w skład promieniowania wchodzi fale elektromagnetyczne o różnych długościach fali (lampa jednocześnie świeci światłem widzialnym jak i grzeje podczerwienią) to dla pewnych długości fali energia promieniowania jest wyższa a dla innych długości niższa. W procesie technologicznym zachodzi potrzeba dobrania właściwych parametrów lampy dla najbardziej optymalnego przebiegu tego procesu np. proces optymalnego nagrzania obrabianego przedmiotu o określonym współczynniku absorpcji wymaga ogrzania promieniowaniem o określonym rozkładzie promieniowania tzn. takim w którym maksymalna wartość natężenia promieniowania wypada dla długości fali dla której obrabiany przedmiot wykazuje największą absorpcję.

Stąd też korzystne byłoby posiadanie charakterystyk lamp grzewczych, na podstawie których można by dobrać takie parametry zasilania elektrycznego, aby maksymalna wartość energii promieniowania przypadła na długość fali dla której absorpcja tego promieniowania dla ogrzewanego przedmiotu była największa. Niniejsze opracowanie ma na celu przedstawienie koncepcji stanowiska kontrolno – badawczego, umożliwiającego wyznaczenie szeregu charakterystyk badanej lampy, opisujących jej własności elektryczne i widmowe.

2. Teoria

Zagadnieniami cieplnymi ciał materialnych zajmuje się gałąź fizyki – termodynamika. Ostateczne wyjaśnienie emisji cieplnej podał Max Planck w 1900 r. Wprowadzając jako pierwszy pojęcie kwantu energii. Dzięki temu zdołał wyjaśnić w sposób ostateczny zagadnienie emisji ciała doskonale czarnego w funkcji temperatury i długości fali. Zależność tą opisuje wzór Plancka na rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego:

$$W_{\lambda T} = \frac{2\pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right]$$

gdzie:

$W_{\lambda T}$ - widmowe natężenie promieniowania ciała czarnego w temperaturze T °K
dla fali o długości λ .

c_0 - prędkość światła w próżni 299792458 m/sek.

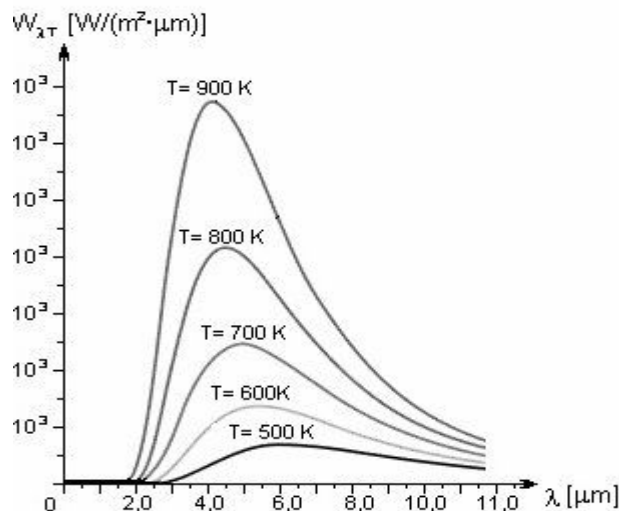
h - stała Plancka $6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}$

k - stała Boltzmannna $1.4 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$

T - temperatura bezwzględna ciała czarnego w °K.

λ - długość fali w μm

Podstawiając kolejne wartości długości fali λ dla każdej temperatury T wyznaczyć można wartości gęstości strumienia cieplnego:

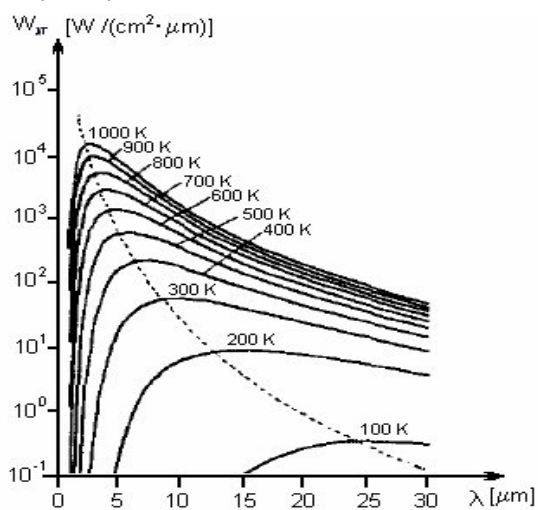


Rys.1 Emitancja widmowa ciała czarnego. Graficzna interpretacja prawa Plancka

Zależność ta określa więc jaka część energii przypada dla określonej długości fali λ przy określonej temperaturze T . Funkcja ta ma swoje maksimum określone wzorem Wiena:

$$\lambda = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (1)$$

Wzór ten mówi nam dla jakiej długości fali rozkład Plancka osiąga maksimum gęstości strumienia cieplnego (emitancji) dla określonej temperatury. Położenie wartości maksymalnej nie jest stałe przy wzroście temperatury ale przesuwa się w kierunku krótszych wartości fali (prawo przesunięć Wiena) co jest zobrazowane na poniższym wykresie:



Rys. 2 Graficzne zobrazowanie prawa przesunięć Wiena

Wzór Plancka podaje rozkład widmowy energii promieniowania **ciała doskonale czarnego** czyli ciała o współczynniku emisji (równym współczynnikowi absorpcji) równym 1 czyli $e=A=1$.

Ponieważ w przyrodzie nie istnieje ciało o takich właściwościach więc wprowadzono pojęcie emisyjności zdefiniowane następująco:

emisyjnością e danego ciała, dla całkowitego zakresu promieniowania, nazywa się stosunek natężenia promieniowania $W_{\lambda b}$ tego ciała do natężenia promieniowania $W_{\lambda T}$ ciała doskonale czarnego, znajdującego się w tej samej temperaturze, czyli:

$$e = \frac{W_{\lambda b}}{W_{\lambda T}}$$

Z tego względu ciała występujące w przyrodzie można podzielić na :

- ciała szare których emisyjność $e = \text{const} < 1$
- ciała szare selektywne których emisyjność $e_{\lambda T} = f(\lambda, T) < 1$ jest zależna od długości fali

Uwzględniając powyższe, wzór Plancka ulega następującej modyfikacji:

$$W_{\lambda T} = e_{\lambda T} \cdot \frac{2\pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{h \cdot c_0}{\lambda \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (2)$$

Wzór ten pozwala oszacować pożądane parametry lampy grzejnej dla określonego procesu technologicznego np. jak dobrać temperaturę i długość fali dla tego procesu by uzyskać właściwą wartość natężenia promieniowania $W_{\lambda T}$. Ponieważ wzór (1) nie określa rodzaju źródła promieniowania więc może być stosowany dla lamp z żarnikiem wolframowym jak również dla lamp z włóknem węglowym a także dla ogrzewaczy ceramicznych. Charakterystyczne cechy lamp zawarte są w współczynniku emisji e . Całkując wzór Plancka w granicach $0 \leq \lambda \leq \infty$ otrzymujemy wzór Stefana – Boltzmann, wyrażający pole pod krzywą Plancka jako całkowitą moc promieniowania P (W), wypromieniowane przez ciało o powierzchni A , temperaturze T i emisyjności e :

$$P = e \cdot \delta \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

gdzie:

e – emisyjność

δ - stała Stefana $5.6693 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot T^4} \right]$

A – pole powierzchni całkowitej z której generowane jest ciepło $[m^2]$

T – temperatura podgrzanego ciała $[^{\circ}K]$

T_0 – temperatura początkowa przed podgrzaniem $[^{\circ}K]$

Przyjmując, że w ustalonym stanie termodynamicznym moc elektryczna, pobierana z sieci zasilającej, równa jest mocy wypromieniowanej z powierzchni podgrzewanego ciała, przy pominięciu strat ciepłych na przewodzenie i unoszenie, otrzymamy:

$$Pe = P_T$$

ponieważ moc elektryczna jest wyrażona wzorem:

$$Pe = U \cdot I \quad [V \cdot A = W] \quad (4)$$

oraz , ponieważ $U = I \cdot R$, to podstawiając do (4) otrzymujemy:

$$Pe = I^2 \cdot R \quad [W]$$

ponieważ $Pe = P_T$, więc porównując stronami (3) i (4) otrzymamy:

$$I^2 \cdot R = e \cdot \delta \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Ponieważ rezystancja R , z drugiej strony określona jest poprzez parametry geometryczne i własności materiałowe więc:

$$R = \frac{\zeta \cdot l}{S}$$

gdzie:

ζ - rezystywność wolframu w [$\Omega \cdot m$]

l – długość drutu wolframowego w [m]

S - przekrój drutu wolframowego [m^2]

ponadto $S = \pi \cdot r^2$ gdzie r – promień drutu wolframowego w [m]

więc podstawiając powyższe do wzoru określającego moc, otrzymamy:

$$I^2 \cdot \zeta \cdot \frac{l}{\pi \cdot r^2} = e \cdot \delta \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4)$$

ponieważ powierzchnia A drutu wolframowego wynosi:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot l$$

więc

$$I^2 \cdot \zeta \cdot \frac{l}{\pi \cdot r^2} = e \cdot \delta \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot r \cdot (T^4 - T_0^4)$$

upraszczając i grupując otrzymamy:

$$r = \sqrt[3]{\frac{\zeta}{2 \cdot \pi \cdot e \cdot \delta \cdot (T^4 - T_0^4)}} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

wzór na promień drutu wolframowego wyznaczany na podstawie pomiarów, gdzie:

ζ - rezystywność wolframu w [$\Omega \cdot m$]

e - emisyjność wolframu [bezwymiarowa]

δ - stała Stefana $5.6693 \cdot 10^{-8}$ [$\frac{W}{m^2 \cdot T^4}$]

T - temperatura rozgrzanego włókna wolframowego [$^{\circ}\text{K}$]

T_0 – temperatura otoczenia [$^{\circ}\text{K}$]

Długość drutu wolframowego tworzącego skrętkę żarnika lampy można wyznaczyć z wzoru na rezystancję R :

$$R = \frac{\zeta \cdot l}{S}$$

$$l = S \cdot \frac{R}{\zeta}$$

$$l = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{R}{\zeta} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Należy zaznaczyć, że występujące w w/w wzorach współczynniki ζ i e czyli rezystywność wolframu i jego emisyjność nie są wartościami stałymi lecz są zależne od temperatury włókna. Należy więc, dla każdej ustalonej temperatury włókna wolframowego, wyznaczyć te wartości tak, aby można było skorzystać z podanych w/w wzorów.

Wielkościami bezpośrednio mierzonymi na proponowanym stanowisku będą:

To – temperatura otoczenia

Ro – rezystancja włókna wolframowego w temperaturze otoczenia wyznaczana pośrednio z prądu i napięcia badanej lampy

I - zadawane prądy lampy w cyklu pomiarowym

U - mierzone napięcie na zaciskach lampy w cyklu pomiarowym

Kolejne pary pomierzonych wartości U i I wyznaczać będą kolejne wartości rezystancji drutu wolframowego. Ponieważ przy coraz wyższym prądzie pomiarowym I, temperatura drutu wzrasta, to dla każdego takiego punktu wyznaczana będzie rezystancja jako:

$$R_{(T)} = \frac{U}{I} \quad [\Omega]$$

na podstawie wartości tej rezystancji oraz wyznaczanych na początku testu, wartości Ro i To, można obliczyć temperaturę włókna, korzystając z wzoru empirycznego:

$$\frac{R}{R_o} = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,2}$$

dokonując przekształcenia tego wzoru, można wyznaczyć temperaturę T jako:

$$T = T_o \cdot \left(\frac{R}{R_o}\right)^{0,833(3)} \quad [\text{°K}] \quad (7)$$

Znając temperaturę T można wyznaczyć emisyjność i rezystywność włókna wolframowego dla tej temperatury. Korzysta się tu z wzorów empirycznych wyrażających zależność emisyjności e i rezystywności ζ włókna wolframowego od temperatury tego włókna:

$$e(T) = -2.6875 \cdot 10^{-2} + 1.819696 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2.1946163 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (8)$$

oraz

$$\zeta(T) = (-2.74146 + 2.5874 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1.8903 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) \cdot 10^{-8} \quad [\Omega \cdot m] \quad (9)$$

Stanowisko powinno umożliwić badanie lamp o mocach znamionowych 300W, 500W, 750W, 1000W, 1300W, 1500W i 2000W występujących w pięciu odmianach wymiarowych. W związku z tym, powinno być wyposażone w blat wyposażony w pięć punktów mocowania lamp, zaopatrzonych w stosowne uchwyty i szybko rozłączne zaciski do podłączania kabli zasilających badane lampy. Do każdego punktu pomiarowego powinny być doprowadzone przewody zasilające oraz przewody pomiarowe. W czasie pomiaru aktywny jest tylko jeden punkt pomiarowy. Wyboru dokonuje układ przekaźników sterowanych sterownikiem mikroprocesorowym współpracującym z głównym programem komputera stacjonarnego. Zadaniem sterownika, oprócz sterowania wyborem odpowiedniego punktu pomiarowego (dla wybranego typu lampy) jest dokonywanie pomiarów temperatury otoczenia, pomiarów prądów i napięć badanej lampy, sterowanie głównym impulsowym zasilaczem prądowym (zadawanie kolejnych wartości prądów lampy), przesyłanie pomierzonych wartości do komputera głównego, realizującego zadania obliczeniowe, graficzne i wydruku. Dla ułatwienia prowadzenia pomiarów, przy zapewnieniu niezbędnej ich dokładności przyjęto system zasilania prądem stałym gdyż, zgodnie z definicją, wartość skuteczna prądu przemiennego to taka wartość prądu stałego która powoduje takie same skutki cieplne, czyli prąd przemienny o wartości skutecznej np. 10A jest równoważny prądowi stałemu 10A. Stanowisko kontrolno-pomiarowe zasilane będzie z instalacji prądu przemiennego 230V~ danego pomieszczenia i zasilac będzie obwód główny zasilania lamp, sterownik mikroprocesorowy oraz komputer stacjonarny.

Pomierzone wartości przesyłane będą do komputera stacjonarnego, który programowo wyliczy pozostałe parametry badanej lampy wykorzystując podane wyżej wzory (1) – (9)

Schemat blokowy proponowanego stanowiska pokazano na rys. 3.

Opracował: Dewart-Energy

mgr inż. Cezary Suwart