

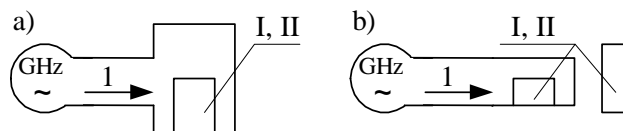
8. BADANIE WNĘKOWEJ NAGRZEWNICY MIKROFALOWEJ

8.1. Cel ćwiczenia:

- zapoznanie się z parametrami elektrycznymi mającymi wpływ na bezpośrednie mikrofalowe nagrzewanie quasi-dielektryków (dielektryków i półprzewodników) i ze sposobami ich nagrzewania,
- zapoznanie się z rozkładami gęstości objętościowych mocy cieplnej we wsadzie poddanym działaniu promieniowania mikrofalowego,
- zapoznanie się z rozkładami gęstości objętościowych mocy cieplnej w nagrzewanych wsadach, umieszczonych we wnęce rezonansowej,
- wyznaczanie sprawności całkowitej wnękowej nagrzewnicy mikrofalowej.

8.2. Wiadomości podstawowe

Metoda mikrofalowa polega na wytworzeniu ciepła na skutek przepływu prądu polaryzacji (przesunięcia) (i ewentualnie prądu przewodzenia) przez ciało stałe lub ciecz, poddane działaniu promieniowania mikrofalowego o częstotliwości od kilkuset megaherców do kilkuset gigaherców, do których energia elektromagnetyczna przenosi się dzięki umieszczeniu ich we wnęce rezonansowej (rys. 8.1a)) lub w falowodzie czy naprzeciw otwartego końca falowodu (rys. 8.1b)).



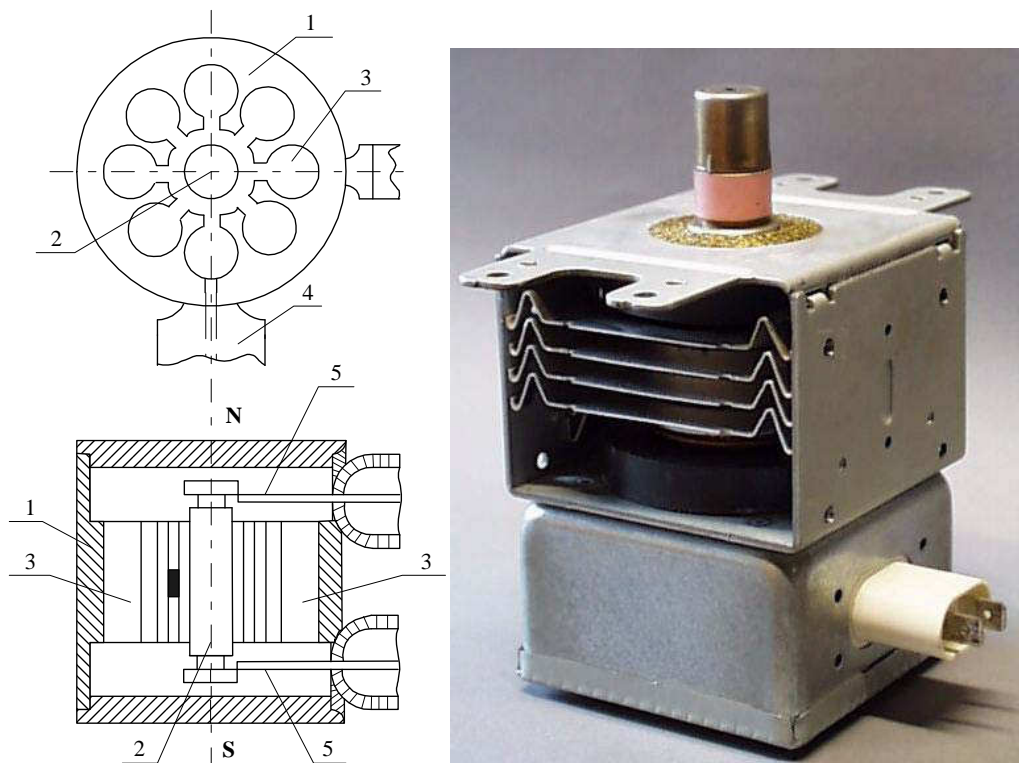
Rys. 8.1. Przemiany energii w metodzie mikrofalowej – nagrzewanie bezpośrednie; I – przetwornik elektrotermiczny, II – wsad, 1 – energia elektromagnetyczna

Przez pojęcie „mikrofały” rozumie się fale elektromagnetyczne o długości λ_{pr} (w próżni) mniejszej niż 1 m – tzn. o częstotliwości $f = c/\lambda_{pr}$ większej niż 300 MHz – które zwykle są falami monochromatycznymi wytwarzanymi w sposób sztuczny metodami typowymi dla elektrotechniki klasycznej. Górna granica pasma mikrofal sięga prawie tysiąca gigaherców, a umownie przyjmuje się, że jest równa 300 GHz ($\lambda_{pr} = 1$ mm).

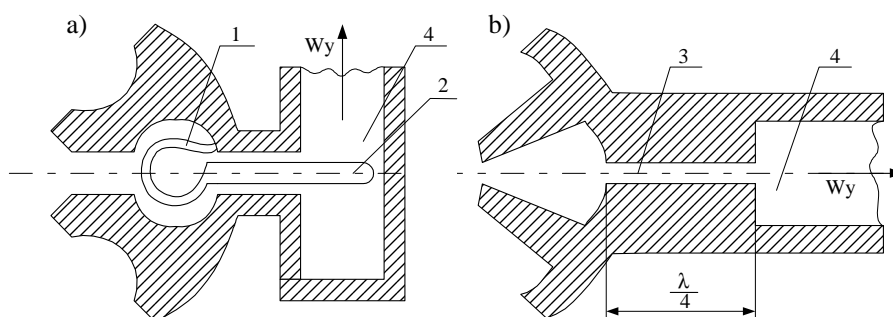
W technice mikrofalowej pojęcie obwodu lub elementu skupionego (np. kondensator, cewka) traci sens, gdyż rozmiary fizyczne układów stają się współmierne z długością fali. Typowymi elementami i „obwodami” w zakresie mikrofal są obwody o stałych rozłożonych (np. wnęki, rury) – utworzone przez odpowiednio uformowane, całkowicie lub częściowo zamknięte odcinki powierzchni przewodzących – tworzące układy charakteryzujące się małymi (w stosunku do pojemności) wartościami indukcyjności.

Początek szerszego wykorzystania mikrofal w grzejnictwie przypada na lata sześćdziesiąte XX stulecia, a do najczęściej stosowanych w praktyce mikrofalowych układów grzejnych zalicza się te z nich, w których nagrzewany wsad qasidielektryczny (dielektryk, półprzewodnik) znajduje się we wnęce rezonansowej, połączonej krótkim odcinkiem falowodu z generatorem mikrofal (zob. rys. 8.1). Wnękowe nagrzewnice mikrofalowe stosowane w elektrotermii bytowej nazywa się popularnie „kuchenkami mikrofalowymi”.

Stosowanym w elektrotermii generatorem mikrofal, czyli przemiennikiem częstotliwości zamieniającymi energię elektromagnetyczną o częstotliwości sieciowej (50Hz) na energię elektromagnetyczną o częstotliwości mikrofalowej, jest magnetron, będący dwuelektrodową próżniową lampą elektronową o nagrzewanej (termo)katodzie i wielownękowej anodzie, poddana działaniu poprzecznego pola magnetostaticznego wytwarzanego przez magnesy stałe (lub elektromagnesy) (rys. 8.2). Na emitowane przez termokatodę elektrony, poruszające się w kierunku anody pod wpływem sił pola elektrycznego, oddziałują siły Lorentza pochodzące od pola magnetostaticznego, co powoduje okrężny ruch strumienia elektronów wokół katody w przestrzeni międzyelektrodowej. Przebiegający obok szczeliny strumień elektronów wzbudza w rezonatorach wnękowych drgania elektromagnetyczne (o częstotliwości zależnej m.in. od średnicy wnęki i szerokości szczeliny). Aby czerpać energię z magnetronu wystarczy, ze względu na silne sprzężenie między rezonatorami, dołączyć obwód wyjściowy do jednej wnęki anodowej. W magnetronach generujących fale decymetrowe (kilka gigaherców), wykorzystywane w grzejnictwie mikrofalowym, wyjście energii wielkiej częstotliwości wykonuje się w postaci antenowej linii współosiowej, której wtyk zakończony jest pętlą sprzęgającą umieszczoną w rezonatorze. Natomiast w przypadku fal milimetrowych czy centymetrowych falowód wyjściowy sprzęga się z jednym z rezonatorów poprzez szczelinę w bloku anodowym (szczelinowy transformator ćwierćfalowy) (rys. 8.3).



Rys. 8.2. Schemat magnetronu o walcowo-szczelinowych rezonatorach i jego widok: 1 – blok anodowy, 2 – termokatoda, 3 – rezonatory, 4 – wyjście mikrofal, 5 – doprowadzenie napięcia żarzenia katody, N, S – bieguny magnesu



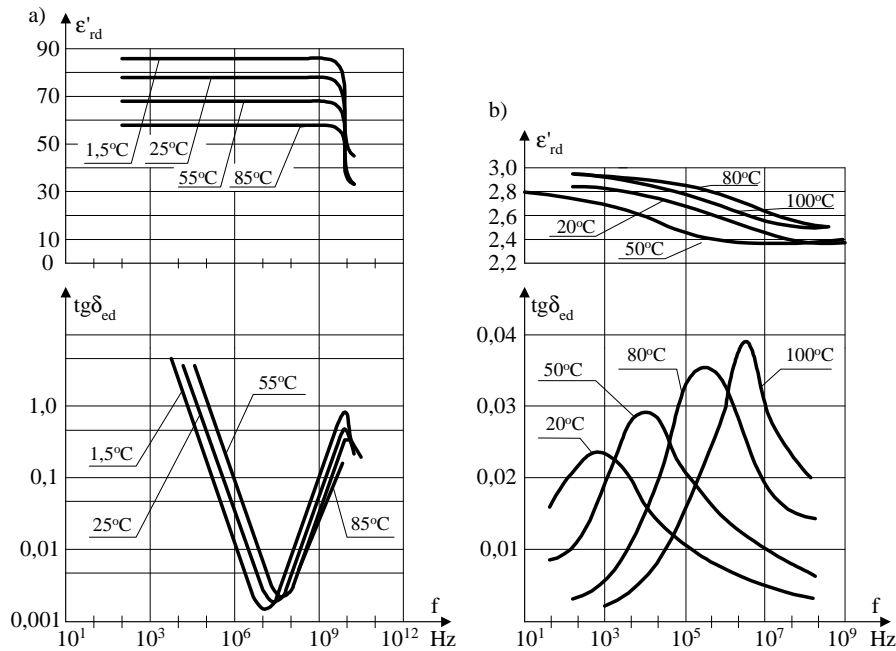
Rys. 8.3. Przykładowe obwody wyjściowe magnetronu: a) wyjście współosiowe; b) wyjście szczelinowe; 1 – pętla sprzęgająca, 2 – wtyk linii współosiowej, 3 – szczelinowy transformator ćwierćfalowy, 4 – falowód rurowy

Gęstość objętościowa $p_e = dP/dV$ (w W/m^3) mocy cieplnej dP , wydzielana w każdej objętości dV wsadu quasidielektrycznego na skutek uporządkowanego ruchu zarówno ładunków swobodnych (p_{pw}) (prąd przewodzenia) jak i ładunków związanych (p_{ps}) (prąd polaryzacji (przesunięcia)), jest równa:

$$p_e = \omega \epsilon_o \epsilon'_{rd} \operatorname{tg} \delta_{ed} E^2 = 2\pi f \epsilon_o \epsilon''_{rd} E^2 = 5,56 \cdot 10^{-11} f \epsilon'_{rd} \operatorname{tg} \delta_{ed} E^2 = p_{pw} + p_{ps} \quad (1)$$

gdzie: ω – pulsacja (w Hz), f – częstotliwość (w Hz), ϵ'_{rd} – część rzeczywista przenikalności dielektrycznej względnej, ϵ_o – przenikalność elektryczna próżni ($\epsilon_o = 8,856 \cdot 10^{-12} A \cdot s / V \cdot m$), ϵ''_{rd} – część urojona przenikalności dielektrycznej względnej, $\operatorname{tg} \delta_{ed}$ – tangens kąta stratności dielektrycznej, E – skuteczna wartość natężenia pola elektrycznego (w V/m).

Wartości: ϵ'_{rd} , ϵ''_{rd} oraz $\operatorname{tg} \delta_{ed}$ są funkcjami zarówno wartości częstotliwości f jak i temperatury (rys. 8.4).



Rys. 8.4. Przebiegi ϵ'_{rd} i $\text{tg} \delta_{ed}$ w funkcji częstotliwości dla zmieniającej się temperatury: a) wody; b) polichlorotrójfluoroetyleny

Rozkład gęstości objętościowej mocy cieplnej p_e w jednorodnym wsadzie zależy od rozkładu wartości natężenia pola elektrycznego E (zob. (1)). Fala elektromagnetyczna docierająca do wsadu ulega częściowemu odbiciu, a wnikając do wsadu podlega procesom tłumienia, objawiającym się maleniem wartości $E=E_0$ na drodze x , liczonej od powierzchni wsadu ($x=0$). Jeżeli by przyjąć, że fala ta jest falą płaską padającą prostopadłe na nieograniczoną powierzchnię jednorodnego i nieferromagnetycznego dielektryka (wsadu) będącego ciałem półnieskończonym (w kierunku rozchodzenia się fali), to tłumienie wartości E opisuje wzór:

$$E_x = E_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (2)$$

gdzie odległość δ (w m), na której stosunek E_x/E_0 zmaleje z wartości 1 (dla $x=0$) do wartości $\exp(-1)=0,368$ (dla $x=\delta$), nazywana jest zastępczą głębokością wnikania i opisywana przybliżonym wzorem:

$$\delta = \frac{0,955 \cdot 10^8}{f \cdot \text{tg} \delta_{ed} \sqrt{\epsilon'_{rd}}} \quad (3)$$

Ze względu na to, że wartość p_e jest funkcją E^2 (zob. (1)), to w odległości δ liczonej od powierzchni wsadu wartość $p_{e\delta}$ wyniesie jedynie $\exp(-2)=0,135$ wartości gęstości mocy cieplnej p_{e0} , występującej na powierzchni wsadu.

Na rzeczywistą wartość natężenia pola E_x w poszczególnych elementarnych objętościach nagrzewanego wsadu, znajdującego się we wnętrzu rezonansowej, mają wpływ nie tylko zjawiska tłumienia – których wyidealizowany (np. bezdyfrakcyjny, zachodzący we wsadzie jednorodnym) opis przedstawia wzór (2) – ale także zjawiska odbicia i interferencji fal, czego konsekwencją jest m.in. występowanie w całej przestrzeni grzejnej różnie rozmieszczonych fal stojących o różnych amplitudach, których położenie zależy m.in. od wymiarów i wzajemnego położenia wsadu, wnęki i wlotu falowodu. Biorąc dodatkowo pod uwagę to, że nagrzewane wsady są zwykle elektromagnetycznie niejednorodne, różniące się między sobą wartościami p_e (1), jakie wystąpią w poszczególnych miejscach nagrzewanego wsadu, są trudno przewidywalne.

Występowanie fal stojących i dodatkowo zjawiska tłumienia fal w nagrzewanych wsadach powoduje, że ich w miarę równomierne nagrzewanie jest możliwe jedynie przy ciągłej zmianie położenia wsadu w trakcie jego nagrzewania lub przy ciągłym przesuwaniu miejsca występowania węzłów fal stojących. Osiąga się to odpowiednio przez umieszczenie wsadów na małosiatkowych obracających się tarczach lub (rzadziej) przez zastosowanie obracających się z niewielką prędkością (kilka obr/min) wirników z metalowymi łopatkami, umieszczonych przy wejściu falowodu do wnęki rezonansowej.

Wartość mocy pobieranej z sieci przez pracującą wnękową nagrzewnicę mikrofalową jest prawie stała, niezależnie od wartości mocy jaka wydziela się we wsadzie. Znaczący to, że w przypadku pracy nagrzewnicy w



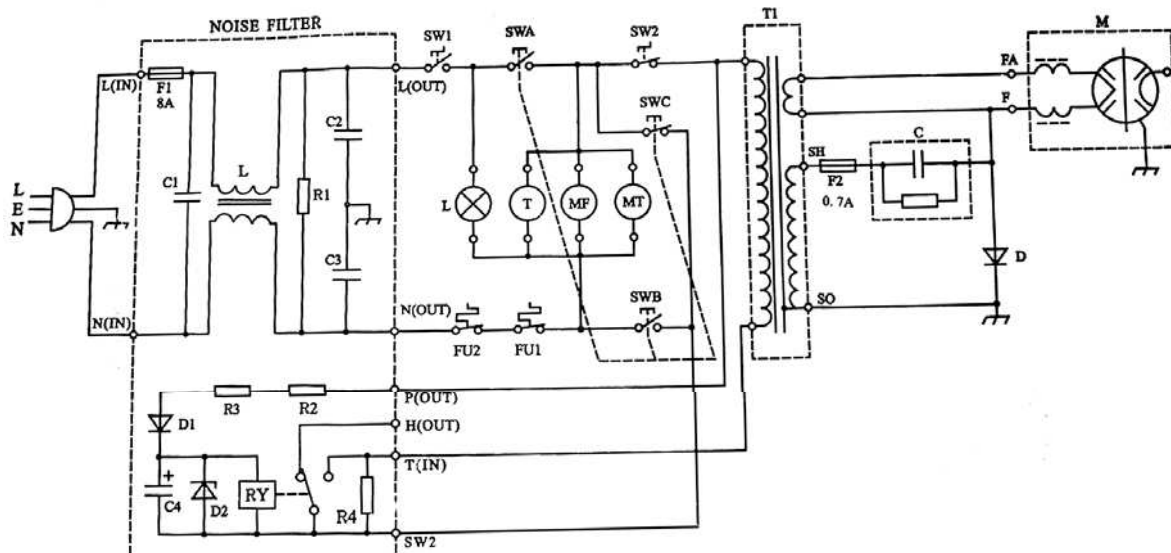
stanie jałowym (brak wsadu) lub prawie jałowym (wsad „małostratny”), całkowita moc pobierana z sieci zamieniana jest na moc cieplną w torze elektromagnetycznym nagrzewnicy, a w tym głównie w magnetronie. Występująca w tym przypadku możliwość ponadnormatywnego wzrostu temperatury różnych części magnetronu, prowadząca do znacznego skrócenia czasu jego bezawaryjnego użytkowania lub wręcz jego termicznego zniszczenia powoduje, że producenci nagrzewnic mikrofalowych nie zalecają ich pracy w stanach jałowych (bez obciążenia).

8.3. Program ćwiczenia

W ćwiczeniu należy mierzyć moc elektryczną P_e pobieraną przez nagrzewnicę, czasy włączenia i wyłączenia nagrzewnicy (czasy τ nagrzewania wsadów), temperatury t wsadów przed nagrzewaniem (t_p) i po nagrzewaniu (t_k), masy m wsadów.

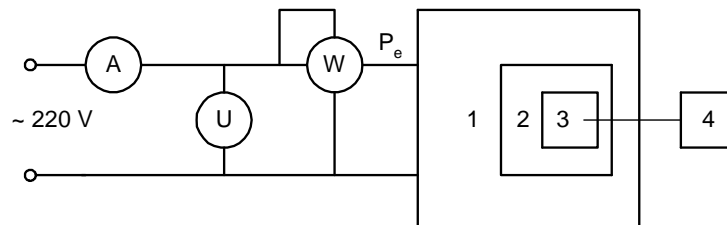
8.4. Przebieg ćwiczenia

8.4.1. Odpisać dane znamionowe nagrzewnicy, wykonać oględziny nagrzewnicy wskazując, na podstawie schematu elektrycznego (rys. 8.5), jej poszczególne części.



Rys. 8.5. Schemat elektryczny nagrzewnicy mikrofalowej: SW1 – pokrętko nastawy czasu grzania, SW2 – pokrętko nastawy mocy grzejnej, SWA, SWB, SWC – wyłączniki drzwiowe bezpieczeństwa, L – lampa oświetlająca wnękę rezonansową, T, MF, MT – silniki odpowiednio: nastawy czasu grzania, wentylatora, obrotu tarczy

8.4.2. Połączyć badaną nagrzewnicę zgodnie z rysunkiem 8.6.



Rys. 8.6. Układ pomiarowy: 1 – nagrzewnica mikrofalowa, 2 – wnęka rezonansowa, 3 – wsad, 4 – miernik temperatury

8.4.3. Wyznaczanie wartości średniej mocy pobieranej przez nagrzewnicę (P_{esr}) przy różnych nastawach pokrętkła regulacji mocy grzejnej

Nastawiać kolejno pokrętkło nastawy mocy grzejnej w trzech położeniach. Dla każdego z położeń pokrętkła: wstawić na tarczę obrotową wnęki rezonansowej 3 szklanki napełnione wodą, włączyć nagrzewnicę i pomierzyć czasy trwania załączenia (τ_z) i wyłączenia (τ_w) magnetronu oraz wartość mocy P_e pobieranej przez nagrzewnicę w czasie trwania załączenia (P_{ez}) i wyłączenia (P_{ew}) magnetronu. Średnią wartość mocy pobieranej przez nagrzewnicę wyliczać ze wzoru:

$$P_{esr} = \frac{P_{ez}\tau_z + P_{ew}\tau_w}{\tau_z + \tau_w} = \frac{P_{ez}\tau_z + P_{ew}\tau_w}{\tau} \quad (4)$$

Nastawa pokrętkła	Magnetron włączony		Magnetron wyłączony		Czas cyklu pracy τ [s]	Moc średnia P_{esr} [W]
	P_{ez} [W]	τ_z [s]	P_{ew} [W]	τ_w [s]		
1						
2						
3						

8.4.4. Wzory służące obliczaniu akumulacyjnych mocy cieplnych wsadów i wyznaczaniu sprawności wnękowej nagrzewnicy mikrofalowej

Nagrzewanymi dwuskładnikowymi obiektami (wsadami) będą szklanki o masie m_s (w kg) wypełnione takimi ciałami o masie m_x (w kg) jak: woda (o masie m_w), kasza (o masie m_k) lub piasek (o masie m_p), których pomierzone uśrednione (szklanka wraz z wypełnieniem) temperatury początkowe (przed nagrzewaniem) i temperatury końcowe (po nagrzewaniu) będą odpowiednio równe t_p i t_k (w deg $^{\circ}\text{C}$ lub K).

Ilość ciepła Q_u (w kJ) zakumulowana w nagrzewanym dwuskładnikowym wsadzie, będąca sumą ilości ciepła zakumulowanego w szklance (Q_s) i w ciele ją wypełniającym (Q_x), można wyliczyć ze wzoru:

$$Q_u = Q_s + Q_x = m_s c_{ws} (t_k - t_p) + m_x c_{wx} (t_k - t_p) \quad (5)$$

gdzie ciepła właściwe c_w (w kJ/kg-deg) wynoszą: dla szkła (c_{ws}) – 0,67, dla wody (c_{ww}) – 4,19, dla kaszy (c_{wk}) – 1,85, dla piasku (c_{wp}) – 0,7.

Uśredniona (w czasie) moc cieplna P_u (w kW), wynikająca z ilości ciepła Q_u jaką zakumulował dwuskładnikowy wsad w czasie τ_z jego nagrzewania, wyniesie:

$$P_u = \frac{Q_u}{\tau_z} = P_s + P_x = \frac{Q_s}{\tau_z} + \frac{Q_x}{\tau_z} = \frac{m_s c_{ws} (t_k - t_p)}{\tau_z} + \frac{m_x c_{wx} (t_k - t_p)}{\tau_z} \quad (6)$$

Sprawność całkowita η_c nagrzewania dwuskładnikowego wsadu w nagrzewnicy mikrofalowej będzie równa:

$$\eta_c = \frac{P_u}{P_e} \quad (7)$$

gdzie P_e (w kW) jest uśrednioną (w czasie) czynną mocą elektryczną, pobieraną przez nagrzewnicę w czasie τ_z .

8.4.5. Wyznaczanie przestrzennego rozkładu mocy grzejnej we wnęcie rezonansowej w przypadku gdy: I – mały wsad (1 szklanka zapełniona w około $\frac{3}{4}$ wodą) znajduje się w 9 różnych miejscach wnęki, II – duży wsad (składający się z 9 równomiernie rozmieszczonych we wnęcie małych wsadów (szklanek zapełnionych w około $\frac{3}{4}$ wodą) wypełnia całą wnękę.

W celu przeprowadzenia badań należy w miejsce obracającej się tarczy wstawić nieruchomą półkę z 9 oznaczonymi polami (poła: 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33) i nastawić pokrętkło nastawy mocy grzejnej nagrzewnicy na wartość maksymalną. Obliczenia przeprowadzić z wykorzystaniem programu MIKROFALA, w którym, po wprowadzeniu odpowiednich danych, wyniki obliczeń można wydrukować w postaci wykresów obrazujących przestrzenne rozkłady mocy we wnęcie rezonansowej.



II. Równoczesne nagrzewanie różnych wsadów

W czasie równym 120 s nagrzewać jednocześnie zważone uprzednio: szklanę z wodą, szklanę z kaszą i szklanę z piaskiem, mierząc ich temperatury początkowe (t_p) i końcowe (t_k) oraz średnią wartość mocy czynnej P_e pobieranej przez nagrzewnicę. Obliczyć wartości: Q_s , Q_x , Q_u , P_u , η_c . Wyznaczyć sumaryczną ilość ciepła Q_{uc} zakumulowaną we wszystkich 3 wsadach, uśrednioną całkowitą moc cieplną P_{uc} , oraz sprawność całkowitą η_c nagrzewania trzech wsadów w nagrzewnicy mikrofalowej.

Rodzaj wsadu	Masy		Temperatury		Moc	Ilości ciepła				Moc	Sprawność
	m_s [kg]	m_x [kg]	t_p [°C]	t_k [°C]	P_e [kW]	Q_s [kJ]	Q_x [kJ]	Q_u [kJ]	Q_{uc} [kJ]	P_{uc} [kW]	η
Woda											
Kasza											
Piasek											

8.5. Zawartość sprawozdania

- schemat oraz zwięzły opis badanych układów,
- zestawienie wszystkich pomiarów i obliczeń,
- analiza uzyskanych wyników,
- ocena badanych układów.

Literatura

1. Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. Wyd. Pol. Poznańskiej, 2006.
2. Hering M.: Podstawy elektrotermii. Cz. 2. WNT, Warszawa 1998.
3. Gozdecki T., Hering M., Łobodziński W.: Elektroniczne urządzenia grzejne. WSiP, Warszawa, 1986.