

Ćwiczenia Nr 4

## NAGRZEWANIE MIKROFALOWE

### 1. WPROWADZENIE.

W mikrofalowych urządzeniach grzejnych efekt polaryzacji (występujący w środowiskach dielektrycznych i półprzewodnikowych) jest wykorzystywany do przekazywania energii pola elektrycznego do wsadu bez mechanicznego lub elektrycznego kontaktu między źródłem i odbiornikiem. Istnieje duże podobieństwo między nagrzewaniem pojemnościowym i mikrofalowym. Różnica między tymi rodzajami nagrzewania wynika ze sposobu doprowadzenia energii elektromagnetycznej wielkiej częstotliwości. W nagrzewaniu pojemnościowym jest ona doprowadzana elektrodami, a w nagrzewaniu mikrofalowym falowodem, co wiąże się ze stosowaniem wyższych zakresów częstotliwości.

Urządzenia mikrofalowe są przeznaczone do pracy w zakresie częstotliwości (0.3÷300)GHz (1GHz =  $10^9$  Hz), a więc znacznie wyższym niż wykorzystywany przy nagrzewaniu pojemnościowym (13÷40 MHz). Potrzeba stosowania tak wielkich częstotliwości wynika z zasady, w myśl której moc wydzielona we wsadzie jest wprost proporcjonalna do częstotliwości zmian pola elektromagnetycznego. W przypadku, gdy nie jest możliwe zwiększenie mocy poprzez zwiększenie natężenia pola elektrycznego, ponieważ może to spowodować przebicie elektryczne wsadu, jedyną drogą realizacji tego celu jest powiększenie częstotliwości pola.

Dla urządzeń mikrofalowych wydzielone zostały cztery dopuszczalne pasma częstotliwości:

Pasmo	Częstotliwość [MHz]	Długość fali [m]
I	915±25	0,328
II	2450±50	0,122
III	5800±75	0,052
IV	22125±125	0,014

Dla celów grzejnych najczęściej wykorzystywane jest pasmo II.

### 2. ZASADA NAGRZEWANIA MIKROFALOWEGO

Energia pola elektromagnetycznego przenoszona przez mikrofałe ulega przekształceniu w ciepło na tej samej zasadzie jak przy nagrzewaniu pojemnościowym. Podobnie i tu decydujące znaczenie w przekształcaniu energii elektrycznej w ciepło ma zjawisko polaryzacji.

W związku z bardzo małą długością fali elektromagnetycznej (szczególnie dla górnych pasm stosowanych zakresów częstotliwości mikrofalowych) występuje tu jednak (podobnie jak przy nagrzewaniu indukcyjnym wsadów metalowych) zjawisko silnego tłumienia fali wewnątrz wsadu.

Niech  $E_{so}$  oznacza wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni wsadu, wówczas jego rozkład w funkcji odległości  $x$  od powierzchni będzie określony zależnością:

$$E_x = E_{so} e^{-x/\delta_d} \quad (1)$$

gdzie:  $\delta_d$  - głębokość wnikania fali do wsadu (droga na jakiej amplituda natężenia pola elektrycznego zostanie  $e$ -krotnie zmniejszona)

Intensywność tłumienia natężenia pola elektrycznego zależna jest więc od głębokości wnikania  $\delta_d$ , której wartość określona jest jednak inną, niż przy nagrzewaniu indukcyjnym, zależnością. Dla  $\text{tg}\delta \leq 0,3$  (co przy nagrzewaniu mikrofalowym występuje w praktyce zawsze), można napisać:

$$\delta_d = \frac{1}{\pi \sqrt{\mu_o \epsilon_o} f \sqrt{\epsilon_r} \text{tg}\delta} \approx 0,95 \frac{10^3}{f \sqrt{\epsilon_r} \text{tg}\delta} \quad (2)$$

gdzie:

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] - przenikalność magnetyczna próżni,

$\epsilon_o = 8,854 \cdot 10^{-12}$  [F/m] - przenikalność dielektryczna próżni,

$\epsilon_r$  - przenikalność dielektryczna względna materiału wsadu,

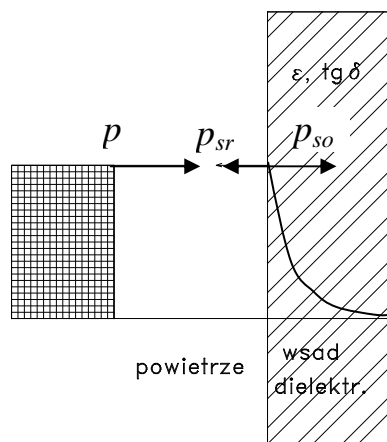
$f$  - częstotliwość [Hz],

$\text{tg}\delta$  - współczynnik strat dielektrycznych materiału wsadu.

Materiały dielektryczne mogą się bardzo różnić wartością głębokości wnikania  $\delta_d$  i tak np. przy częstotliwości 3 GHz przyjmuje ona przykładowo dla lodu wartość ok. 2000 cm, podczas gdy dla steku wynosi ok. 1,7 cm, a dla wody (w temp. pokojowej) kilka centymetrów.

Oznaczmy przez  $p_s$  gęstość powierzchniową mocy fali, tj. moc fali w powietrzu (w pobliżu wsadu) odniesioną do jednostki powierzchni wsadu. Gdy fala elektromagnetyczna płaska o gęstości powierzchniowej mocy  $p_s$  padnie na dielektryczny wsad to jej część o gęstości mocy  $p_{sr}$  ulegnie odbiciu, a część o gęstości  $p_{so}$  wniknie do dielektryka, rys.1, przy czym:

$$p_{so} = p_s - p_{sr} \quad (3)$$



Rys. 1. Rozkład gęstości mocy wnikającej do dielektryka przy padaniu fali płaskiej  
 $p_s$  - gęstość mocy fali padającej,  $p_{sr}$  - gęstość mocy fali odbitej,  $p_{so}$  - gęstość mocy fali wnikającej

Wewnątrz wsadu rozkład gęstość powierzchniowej mocy w funkcji odległości  $x$  od powierzchni będzie określony zależnością:

$$p_{sx} = p_{so} e^{-2x/\delta_d} \quad (4)$$

gdzie:  $\delta_d$  - głębokość wnikania fali do wsadu (na drodze tej wartość gęstości mocy maleje  $e^2$  razy)

Gęstość objętościową mocy  $p_v$  [W/m<sup>3</sup>] wydzieloną przy powierzchni wsadu można wyrazić zależnością:

$$p_v = 55,6 \cdot 10^{-12} E^2 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta f \quad (5)$$

przy czym:

$E$  - natężenie pola elektrycznego [V/m],

$f$  - częstotliwość [Hz].

Gęstość objętościowa  $p_{vx}$  wydzielona we wsadzie w odległości  $x$  od powierzchni wynosi więc:

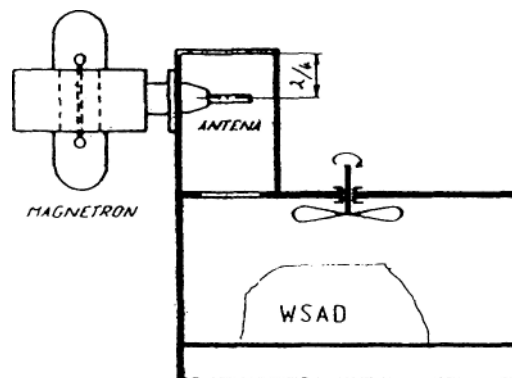
$$p_{vx} = p_v \cdot e^{-2x/\delta_d} = 55,6 \cdot 10^{-12} \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta f E_{so}^2 e^{-2x/\delta_d} \quad (6)$$

Znajomość rozkładu gęstości mocy we wsadzie umożliwia określenie efektu grzejnego wyrażającego się wzrostem temperatury wsadu.

### 3. PIECE I NAGRZEWNICE MIKROFALOWE

W użyciu są dwa rodzaje urządzeń grzejnnych mikrofalowych: nagrzewnice i piece (kuchenki).

Na Rys.2 przedstawiono schemat blokowy kuchenki mikrofalowej.

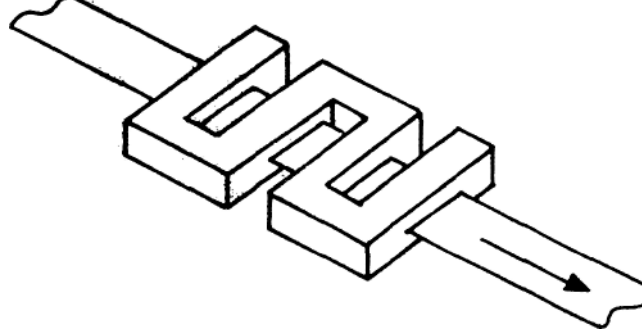


Rys.2. Kuchenka mikrofalowa.

W piecu mikrofalowym źródłem wytwarzającym mikrofałe jest magnetron. Mikrofałe są transmitowane z magnetronu do komory grzejnej przy pomocy falowodu. Wewnątrz komory mikrofałe odbijają się od ścian bocznych, sufitu i dna komory przenikając wsad.

Komora grzejna w przypadku nagrzewania mikrofalowego nazywana jest rezonatorem wnękowym. Ściany rezonatora nie nagrzewają się ponieważ odbijają one mikrofałe. W celu uzyskania bardziej równomiernego efektu grzejnego stosuje się wiatrak w górnej części komory grzejnej. Mikrofałe odbijają się od skrzydełek wiatraka i są w ten sposób rozpraszane. Zwiększenie równomierności nagrzewani można również uzyskać poprzez obrót wsadu (talerz obrotowy).

Efekt grzejny można również uzyskać umieszczając wsad bezpośrednio w falowodzie (nagrzewnica mikrofalowa).



Rys. 3. Nagrzewnica mikrofalowa

Na Rys.3 przedstawiono nagrzewnicę do suszenia materiałów w postaci taśmy. Falowód w przekroju prostokątnym ma kształt meandryczny. Energia mikrofal jest wprowadzana z magnetronu umieszczonego na jednym z końców falowodu. Wsad jest przeciągany przez szczeliny wycięte w ścianach bocznych falowodu i absorbuje energię tylko wówczas, gdy znajduje się wewnątrz odcinka falowodu. Wartość temperatury niezbędnej do procesu suszenia reguluje się przy stałej mocy źródła poprzez zmianę prędkości przesuwania wsadu oraz zmianę długości falowodu.

Jednym z najistotniejszych parametrów energetycznych urządzeń jest ich całkowita sprawność elektryczna  $\eta_{el}$ . W przypadku urządzeń mikrofalowych jest ona zależna od następującego ciągu przemian energetycznych:

50 Hz → prąd stały → energia w.cz. (magnetron) → falowód → wsad

Dla urządzeń elektrotermicznych za najistotniejszą należy uznać całkowitą sprawność elektrotermiczną  $\eta_{et}$  rozumianą jako iloczyn sprawności elektrycznej  $\eta_{el}$  oraz sprawności cieplnej  $\eta_c$ :  $\eta_{et} = \eta_{el} \eta_c$ .

Dla urządzeń mikrofalowych tak rozumiana sprawność całkowita wynosi przeciętnie od ok. 35% dla urządzeń małej mocy (1-5kW) do ok. 65% dla urządzeń większej mocy (10-50kW).

#### 4. ZASTOSOWANIE

Mikrofalowe urządzenia grzejne znajdują zastosowanie w przemyśle, gastronomii, medycynie oraz w gospodarstwach domowych. Piece (kuchenki) mikrofalowe są stosowane głównie w gastronomii do podgrzewania potraw. Ciekawym zastosowaniem mikrofal jest nagrzewanie w procesie liofilizacji. Proces ten polega na tzw. zamrażaniu osuszającym (produkt zostaje głęboko zamrożony i następnie w próżni następuje sublimacja

rozpuszczalnika, energia do sublimacji np. dostarczana drogą nagrzewania mikrofalowego), co pozwala na magazynowanie produktów w temperaturze pokojowej.

Zakres zastosowań grzejnictwa mikrofalowego jest rozwinięciem grzejnictwa pojemnościowego (zgrzewanie folii z tworzyw sztucznych, niszczenie szkodników, sterylizacji nasion, diatermia itp.). Istnieją także dziedziny, w których mikrofalowa technika grzejna znalazła wyłączność: np. nagrzewanie pewnych gatunków gumy i kauczuku przy wulkanizacji, nagrzewanie krwi oraz rozmrażanie przechowywanych organów dla celów chirurgicznych.

## **5. BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENA PRACY PRZY URZĄDZENIACH GRZEJNYCH WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI**

Eksploatacja urządzeń w.cz. związana jest z występowaniem silnych pól elektromagnetycznych, w których przebywanie jest szkodliwe dla zdrowia. Z tego względu stosuje się ograniczenia promieniowania energii do otoczenia przy pomocy wielokrotnego ekranowania urządzeń metalowymi siatkami i arkuszami blachy. Poprawne działanie ekranów powinno być okresowo kontrolowane poprzez sprawdzanie natężenia pola wokół urządzeń w.cz.. Pracownicy zatrudnieni przy urządzeniach grzejnych w.cz. powinni być poddawani okresowej kontroli lekarskiej.

## **6. ZAKŁÓCENIA RADIOELEKTRYCZNE WYWOŁANE PRACĄ URZĄDZEŃ GRZEJNYCH WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI**

Podczas pracy urządzeń grzejnych wielkiej częstotliwości pewna ilość energii zostaje rozproszona stając się źródłem zakłóceń. Poza promieniowaniem o częstotliwości roboczej występuje promieniowanie o częstotliwościach harmonicznych, wskutek czego zakłócenia mogą wystąpić również w zakresie fal radiowych i telewizyjnych, zakłócając łączność nawet wiele kilometrów od źródła zakłóceń.

Przyczynami zakłóceń radioelektrycznych są najczęściej:

- zły styk między drzwiami lub płytami obudowy i jej masą,
- zbyt duże otwory wentylacyjne i wzierniki,
- nadmiernie długie doprowadzenia i linie przesyłowe,
- złe uziemienie generatora lub ekranów.

Dopuszczalne poziomy zakłóceń radioelektrycznych oraz metody ich badań precyzują Polskie Normy.

## **7. CEL ĆWICZENIA**

Celem ćwiczenia jest poznanie specyficznych własności nagrzewania mikrofalowego z uwzględnieniem jego cech energetycznych.

## **8. PROGRAM ĆWICZENIA**

8.1. Wyznaczenie sprawności całkowitej  $\eta_{et}$ .

A)

Przy załączonej pełnej mocy kuchenki doprowadzić do wrzenia kolejno 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 l wody w zlewce szklanej. Dla łatwiejszego zainicjowania procesu wrzenia, po osiągnięciu

temperatury wrzenia, umieścić w wodzie kształtkę ceramiczną. Wyniki pomiarów zanotować w poniższej tabeli.

Masa wody [kg]	Temperatura początkowa [°C]	Czas nagr. do wrzenia [s]	Moc pobierana z sieci [W]	Energia pobrana z sieci $E_p$ [J]	Energia zakumulowana $E_a$ [J]	Sprawność całkowita $\eta_{et}=E_a/E_p$
0,2						
0,4						
0,6						
0,8						

B)

Przy załączonej pełnej mocy kuchenki nagrzewać przez czas ..180.s kolejno 0,5 l wody oraz oleju.

Przed oraz bezpośrednio po zakończeniu procesu nagrzewania pomierzyć temperaturę nagrzewanego medium przy użyciu termometru rtęciowego. W trakcie nagrzewania pomierzyć moc zasilającego kuchenkę prądu częstotliwości sieciowej. Wyniki pomiarów zanotować w poniższej tabeli.

Rodzaj medium	Moc pobierana z sieci $P$ [W]	Temperatura początkowa $\vartheta_p$ [°C]	Temperatura końcowa $\vartheta_k$ [°C]	Energia pobrana z sieci $E_p$ [J]	Energia zakumulowana $E_a$ [J]	Sprawność całkowita $\eta_{et}=E_a/E_p$
woda						
olej						

Przyjąć ciepło właściwe oleju równe  $c_{olej}=1965$  [J/(kg K)], wody  $c_{wody}=4180$  [J/(kg K)]

8.2. Wykorzystanie kuchenki mikrofalowej do podgrzewania potraw.

Sprawdź efektywność nagrzewania różnych produktów żywnościowych

## 9. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

9.1.

A) Wyznaczyć sprawność całkowitą  $\eta_{et}$  dla przypadków nagrzewania różnych  $m$  mas wody. Sporządzić wykres  $\eta_{et}=f(m)$ . Omówić otrzymany wykres.

B) Wyznaczyć  $\eta_{et}$  dla przypadku nagrzewania wody oraz oleju oraz omówić przyczyny występującej różnicy.

## 10. LITERATURA

[1] Hering M., Podstawy elektrotermii cz1, cz2, WNT Warszawa

[2] Zgraja J., Wykład z przedmiotu „Podstawy wymiany i generowania ciepła”

## PYTANIA KONTROLNE

1. Na czym polega nagrzewanie mikrofalowe?
2. Czym nagrzewanie mikrofalowe różni się od nagrzewania pojemnościowego?
3. Jakiego rodzaju materiały można nagrzewać metodą mikrofalową?
4. Jak zbudowana jest kuchenka mikrofalowa?
5. Co powiesz o równomierności nagrzewania wsadu metodą mikrofalową?
6. Od czego zależy intensywność nagrzewania mikrofalowego?
7. Co to jest i od czego zależy głębokość wnikania fali elektromagnetycznej do wsadu dielektrycznego?