



**AGH**



**Euro - Centrum**

**Studia Podyplomowe**

# **EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**

## **Nagrzewanie pojemnościowe i mikrofalowe**

**dr hab. inż. Jerzy Pasternak, prof. AGH**

Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Moduł 5: Efektywność energetyczna  
w urządzeniach elektrotermicznych

# **Nagrzewanie pojemnościowe i mikrofalowe**

**dr hab. inż. Jerzy Pasternak, prof. AGH**

# Część 1

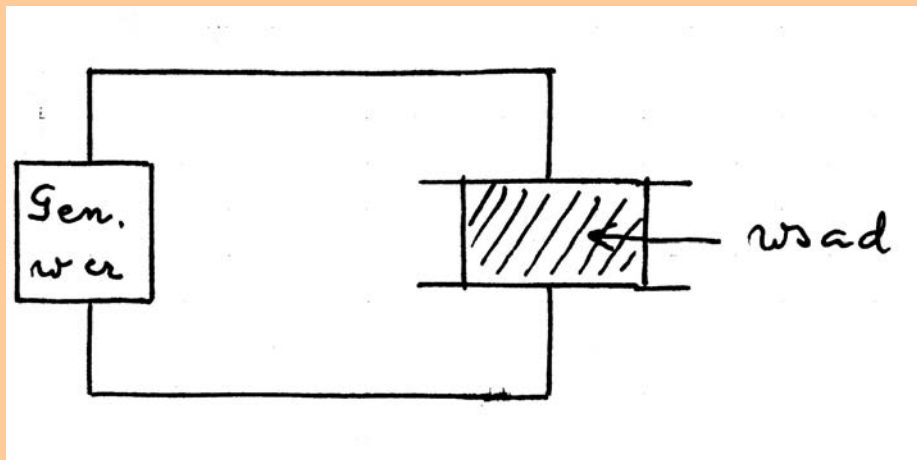
## Nagrzewanie pojemnościowe

**Nagrzewanie pojemnościowe** jest to nagrzewanie elektryczne związane z efektami polaryzacji i przewodnictwa *w ośrodkach dielektrycznych i półprzewodnikowych*, do których energia elektromagnetyczna wielkiej częstotliwości jest doprowadzona za pośrednictwem elektrod.

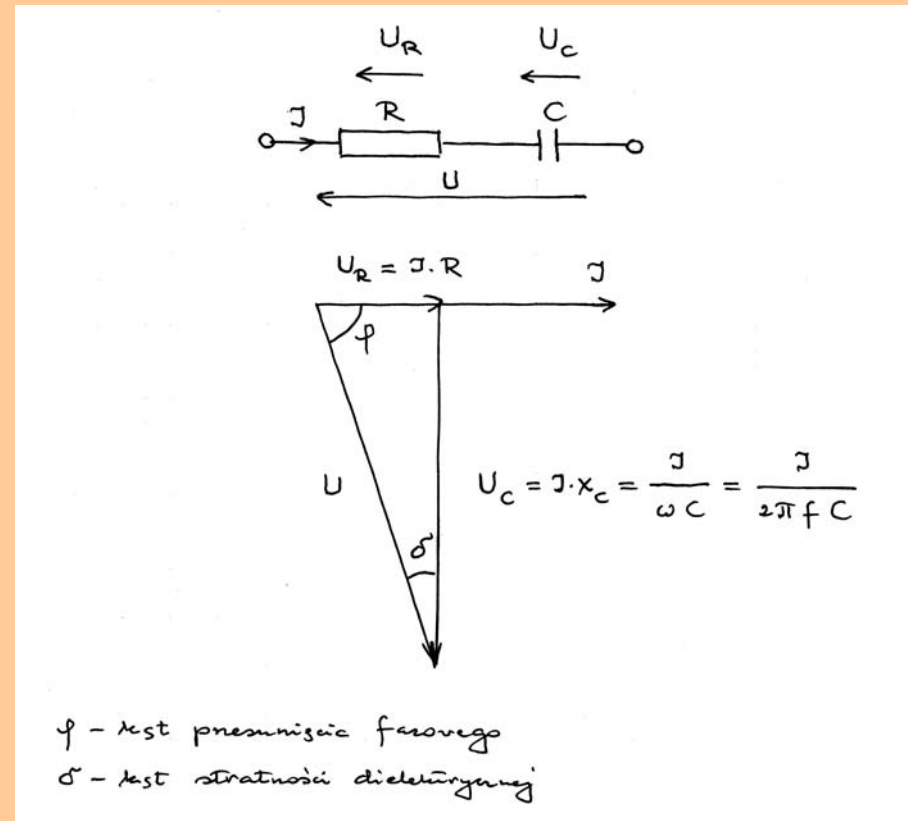
W 1864 r. W. Siemens wyjaśnił nagrzewanie się dielektryków w kondensatorze.

W 1899 r. R. von Zeyneck zastosował prąd o częstotliwości 200 kHz w diatermii.

# Nagrzewnica pojemnościowa



**Model nagrzewnicy pojemnościowej**



**Model wsadu**

# Moc grzejąca dielektryk

$$P = I^2 R = IU_R$$

Ponieważ

$$U_C = U \cos \delta \quad U_C = \frac{I}{2\pi f C}$$

więc  $I = 2\pi f C U \cos \delta$

również  $U_R = U \sin \delta$

Moc grzejąca dielektryk to więc

$$P = 2\pi f C U^2 \sin \delta \cos \delta$$

Z trygonometrii wiadomo, że

$$\sin \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} \quad \cos \delta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}$$

dlatego  $P = 2\pi f C U^2 \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$

# Moc grzejąca dielektryk (2)

Współczynnik stratności $\text{tg}\delta$	
drewno jodłowe z 10% zawartością wody	0,09
folia PCV	0,05
guma silikonowa	0,0032
papier z 10% zawartością wody	0,12
porcelana	0,055
szkło	0,010

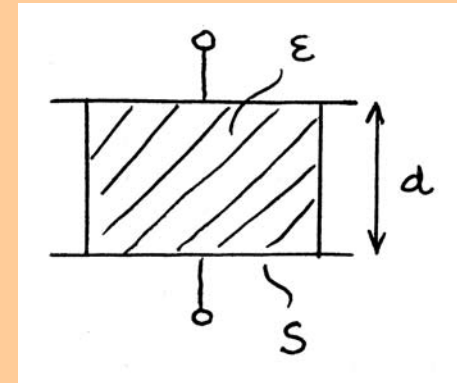
We wcześniejszym wzorze mianownik można przyjąć w przybliżeniu równy 1, stąd

$$P \cong 2\pi f C U^2 \text{tg}\delta \text{ [W]}$$

# Kondensator płaski

Pojemność kondensatora płaskiego wynosi

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}$$



Przenikalność elektryczna wynosi  $\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r \left[ \frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$

gdzie:  $\varepsilon_o = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{F}}{\text{m}} \right]$  - przenikalność elektryczna próżni

$\varepsilon_r [1]$  - przenikalność elektryczna względna

$$P = 2\pi f U^2 \frac{\varepsilon S}{d} \operatorname{tg} \delta = 2\pi f U^2 \frac{\varepsilon S d}{d^2} \operatorname{tg} \delta = 2\pi f \left( \frac{U}{d} \right)^2 \varepsilon V \operatorname{tg} \delta$$

gdzie:  $\frac{U}{d} = E$  - natężenie pola elektrycznego

$V = S \cdot d$  - objętość dielektryka

# Moc grzejna na jednostkę objętości wsadu

$$p_V = \frac{P}{V} = 2\pi f E^2 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \left[ \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} \right]$$

Zgodnie z powyższym wzorem wsad powinien nagrzewać się równomiernie.



# Częstotliwości wydzielone dla pojemnościowych urządzeń grzeijnych

$$f_1 = 3,39 \text{ [MHz]}$$

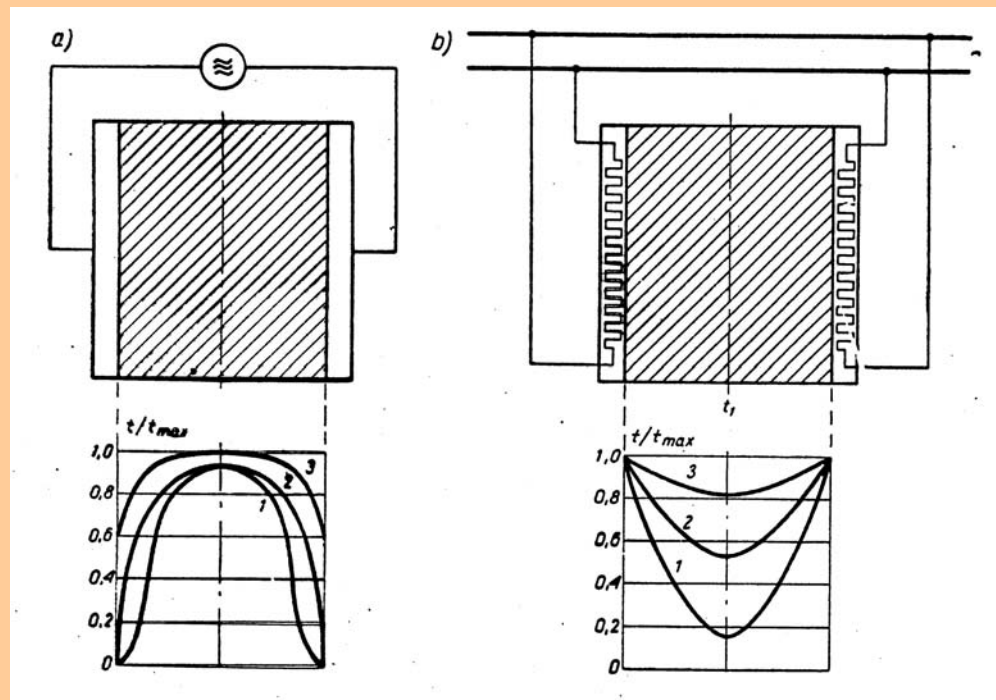
$$f_2 = 4f_1 = 13,56 \text{ [MHz]}$$

$$f_3 = 2f_2 = 27,12 \text{ [MHz]}$$

$$f_4 = 3f_2 = 40,68 \text{ [MHz]}$$

# Rozkład temperatur przy nagrzewaniu pojemnościowym

Nagrzewanie pojemnościowe, dzięki równomiernemu wytwarzaniu się ciepła w całej masie materiału, zapewnia dość korzystny rozkład temperatury we wsadzie, zwłaszcza w porównaniu z pośrednimi metodami nagrzewania. Zaburzenia w tej równomierności powoduje odprowadzanie ciepła przez okładki kondensatora oraz powstawanie fal stojących.



Poprzeczny rozkład temperatur w wsadzie:  
a) przy nagrzewaniu pojemnościowym;  
b) przy nagrzewaniu stykowo-oporowym

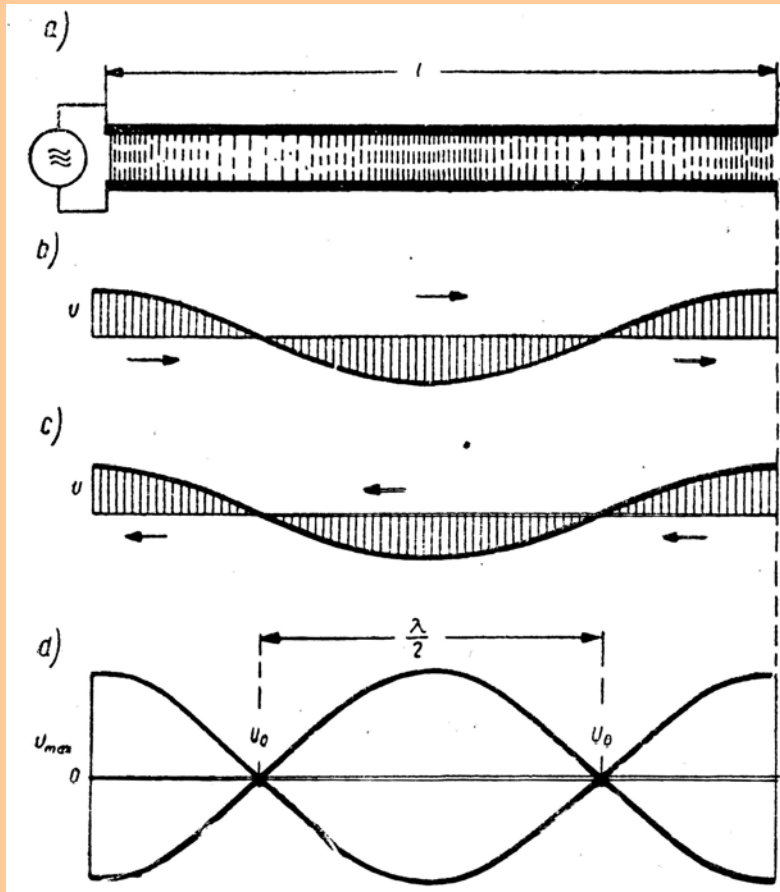
Izotermy 1, 2, 3 oznaczają kolejne stadia nagrzewania wsadu

# **Fale stojące we wsadzie nagrzewanym metodą pojemnościową**

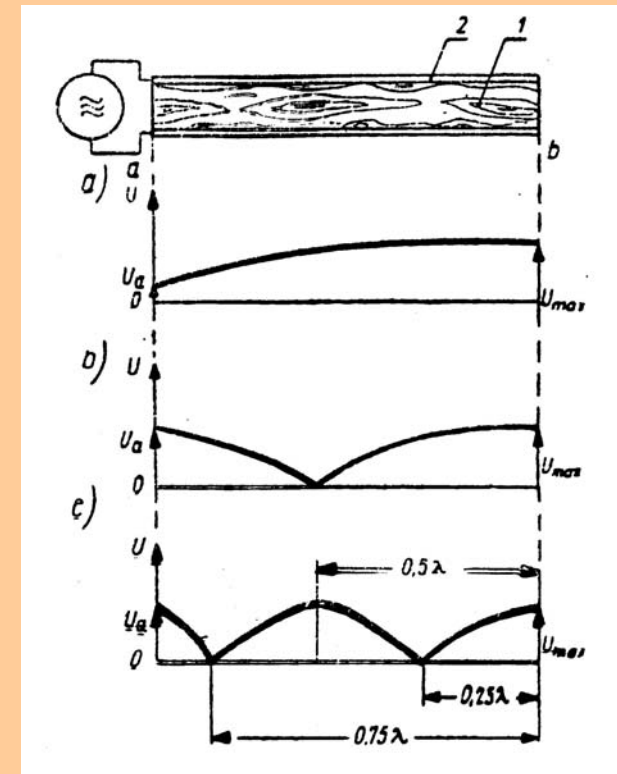
Stosowanie zbyt dużych częstotliwości może być niepożądane przy nagrzewaniu wsadów o dużych rozmiarach ze względu na nierównomierność rozkładu temperatury, wynikającą z nierównomierności rozkładu napięć na elektrodach spowodowanej powstawaniem fal stojących napięcia.

We wsadach większych rozmiarów przy częstotliwościach stosowanych w grzejnictwie pojemnościowym występują zjawiska podobne jak w elektroenergetyce w liniach długich.

# Fale stojące - ilustracja



Tworzenie się fali stojącej we wsadzie nagrzanym pojemnościowo: a) rozkład pola elektrycznego; b) rozkład pierwotnej fali napięcia; c) rozkład odbitej fali napięcia; d) rozkład fali stojącej napięcia w materiale



Rozkład napięcia na elektrodach kondensatora grzejanego  
1 - wsad; 2 - elektrody

# Zastosowanie nagrzewania pojemnościowego

- Wstępne podgrzewanie przed prasowaniem *tworzyw termoutwardzalnych* proszkowych. Masy plastyczne termoutwardzalne składają się głównie z żywic syntetycznych i wypełniacza proszkowego (mączka drzewna) lub włóknistego (włókno szklane). Masy takie po podgrzaniu do temperatury ok. 430 K stają się plastyczne i przez prasowanie w formach stalowych otrzymuje się gotowy wyrób, jak np. podstawki do układów scalonych, obudowy przyrządów elektrycznych, gniazda wtykowe, przyciski itp.
- *Tworzywa termoplastyczne*, w odróżnieniu od termoutwardzalnych, mogą być po ochłodzeniu ponownie roztopione. Tworzywa takie można łączyć ze sobą przez zgrzewanie metoda pojemnościową.

# Zastosowanie nagrzewania pojemnościowego (2)

- Nagrzewanie pojemnościowe drewna w procesie jego suszenia odznacza się wybitnymi korzyściami. Zewnętrzne warstwy nagrzewanego drewna mają skutek strat ciepłych temperaturę niższą niż warstwy wewnętrzne, co powoduje przenikanie wilgoci z warstw środkowych do zewnętrznych.

Dielektryk	$\epsilon_r$	$\gamma$ [S/m]
Próżnia	1	0
Powietrze pod ciśnieniem atmosferycznym	1,0006	$0+10^{-16}$
Papier kondensatorowy	2,1+3,6	$10^{-19}+10^{-17}$
Polistyren	2,2+2,8	$10^{-19}+10^{-17}$
Polichlorek winylu	3,3	$10^{-19}+10^{-18}$
Bakelit	5	$10^{-9}$
Żywica epoksydowa	5+7,5	$10^{-17}+10^{-16}$
Mika	6	$10^{-15}$
Porcelana elektrotechniczna	6	$10^{-16}+10^{-6}$
Steatyt	6+8	$10^{-15}+10^{-9}$
Korund	9	$10^{-15}+10^{-12}$
Woda destylowana	81	$10^{-5}$

Suszenie pojemnościowe drewna zapobiega jego pękaniu.

- Nagrzewanie pojemnościowe jest stosowane też do sklejanego drewna.

Tabela: Parametry niektórych dielektryków

# Zastosowanie nagrzewania pojemnościowego (3)

- W przemyśle spożywczym wykorzystuje się nagrzewanie pojemnościowe do sterylizacji różnych produktów żywnościowych, do suszenia jarzyn, grzybów, ziarna, mąki, drożdży, makaronu, tytoniu oraz niszczenia w nich pasożytów.
- W przemyśle papierniczym można suszyć metodą pojemnościową papier i materiały celulozowe.
- W przemyśle tekstylnym można suszyć materiały tekstylne.
- W przemyśle odlewniczym suszy się rdzenie formierskie.
- W przemyśle gumowym można stosować nagrzewanie pojemnościowe w procesach wulkanizacyjnych.
- nagrzewanie pojemnościowe znalazło też zastosowanie w medycynie (diatermia).

## Część 2

# Nagrzewanie mikrofalowe

**Nagrzewanie mikrofalowe** jest to nagrzewanie elektryczne związane z efektem polaryzacji w ośrodkach dielektrycznych i półprzewodnikowych, do których energia elektromagnetyczna wielkiej częstotliwości doprowadzana jest *falowodem*.

Nagrzewanie mikrofalowe stanowi rozwinięcie nagrzewania pojemnościowego, jednak różnice między tymi metodami są istotne.

Pierwsze zastosowanie mikrofal do celów grzejnych należy przypisać Amerykaninowi Percy Spencerowi, który zbudował piec mikrofalowy w 1945 r., w 5 lat po wynalezieniu magnetronu wielowłóknowego.

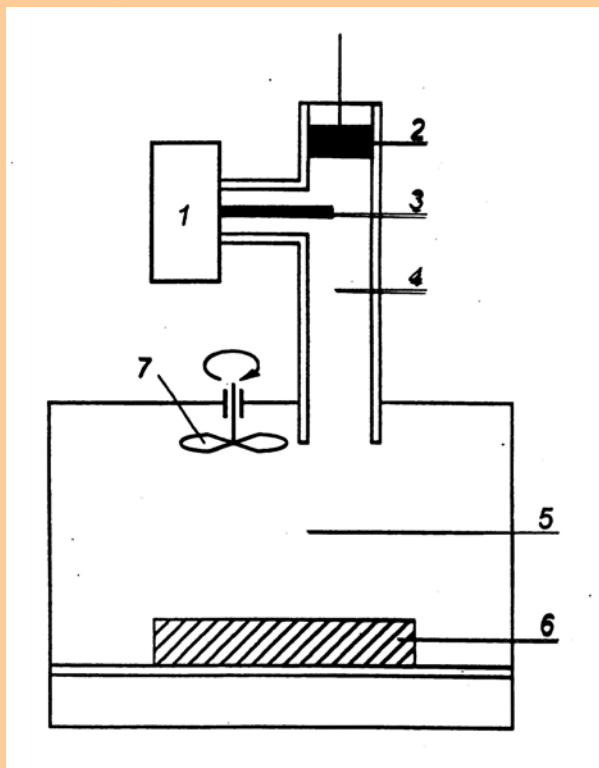


# Pasma częstotliwości

*Tabela:* Pasma częstotliwości wydzielone dla mikrofalowych urządzeń grzejnych

Pasmo	Częstotliwość [MHz]	Długość fali [cm]
I	$915 \pm 25$	32,79
II	$2375 \pm 50$	12,63
III	$5800 \pm 75$	5,17
IV	$22125 \pm 125$	1,36

# Schemat pieca mikrofalowego



**Schemat pieca mikrofalowego**

Przy bardzo wielkich częstotliwościach pojęcie obwodu elektrycznego zawierającego elementy skupione  $RLC$  traci sens. Wymiary geometryczne elementów składowych obwodu stają się współmierne z długością fali. Z tego powodu w piecu mikrofalowym zamiast kondensatora grzejnego stosuje się rezonator wnękowy 5, który jest połączony falowodem 4 z generatorem bardzo wielkiej częstotliwości 1, jakim jest najczęściej magnetron. Fala elektromagnetyczna wypromieniowana przez antenę 3 jest doprowadzona przez falowód z elementem dopasowującym 2 do wsadu 6. Wewnątrz rezonatora umieszcza się element wirujący 7.

# Moc grzejna i głębokość wnikania

Wzór na moc grzejną na jednostkę objętości wsadu przy nagrzewaniu mikrofalowym ma identyczną postać jak przy nagrzewaniu pojemnościowym

$$p_V = 2\pi f E^2 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \left[ \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} \right]$$

Głębokość wnikania rozumiana jako odległość od powierzchni wnikania fali, przy której gęstość objętościowa mocy maleje  $e^2$  - razy wynosi

- dla dielektryka

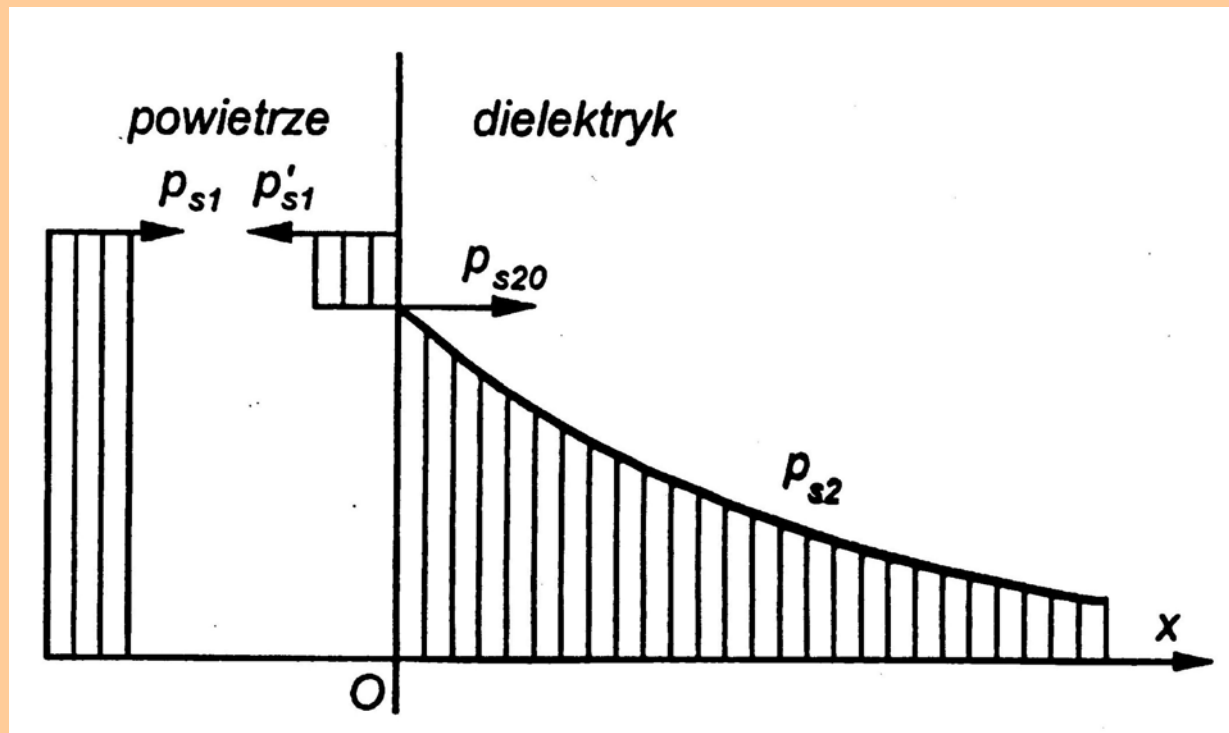
$$\delta = \frac{1}{\pi f \sqrt{\mu_0 \varepsilon} \operatorname{tg} \delta}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

- dla porównania w metalu

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}$$

# Rozkład gęstości powierzchniowej mocy wnikającej do dielektryka przy padaniu fali płaskiej



# Zastosowania nagrzewania mikrofalowego

Mikrofalowych urządzeń grzejnych używa się:

- W gospodarstwach domowych do nagrzewania potraw (wsadu), zawierających najczęściej znaczne ilości wody. Proces przebiega bardzo szybko, przy czym nie jest wymagane dodawanie wody i tłuszczu.
- W gastronomii, gdzie wcześniej przygotowane potrawy podgrzewa się. Oprócz punktów gastronomicznych nagrzewnice mikrofalowe są m. in. w samolotach, statkach morskich i kosmicznych.
- W procesach liofilizacji, gdzie produkt zamraża się a następnie przez bardzo szybkie nagrzanie lód przechodzi bezpośrednio w stan gazowy.

# Zastosowania nagrzewania mikrofalowego

- W przemyśle do suszenia papieru, drewna, lakierów, farb, skór oraz substancji proszkowych w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym.
- W medycynie do nagrzewania krwi oraz rozmrażania organów ciała do celów chirurgicznych.

Grzejnictwo mikrofalowe znajduje również zastosowanie w procesach, w których bywa też stosowane nagrzewanie pojemnościowe.

# Biologiczne skutki oddziaływania pól elektromagnetycznych o częstotliwościach od 10 MHz do 300 GHz

Większość badań dotyczących oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe, a w szczególności na ludzi, obejmuje przedział częstotliwości charakterystycznych dla nagrzewania pojemnościowego i mikrofalowego. Oceny i wnioski z tych badań zawarte są w raportach wielu międzynarodowych i narodowych organizacji m. in. Światowej Organizacji Zdrowia, Międzynarodowego Komitetu ds. Promieniowania Niejonizującego. Generalny wniosek wynikający z tych raportów jest następujący: oddziaływanie fal o częstotliwościach określonych w tytule, na materię biologiczną powoduje gromadzenie energii elektromagnetycznej powodującej wzrost temperatury. Skutki wzrostu temperatury mogą mieć charakter odwracalny bądź nieodwracalny.

Przepisy normalizacyjne powinny dopuszczać takie poziomy napromieniowania, które całkowicie wykluczają możliwość powstania efektów nieodwracalnych.

**Dziękuję za uwagę**