

Studia Podyplomowe

# EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**

**Urządzenia rezystancyjne.  
Regulacja temperatury w grzejnictwie rezystancyjnym.  
Nagrzewanie rezystancyjne w przemyśle  
i ogrzewnictwie. Promienniki podczerwieni.**

**dr inż. Zbigniew Waradzyn**

Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Moduł 5: Efektywność energetyczna  
w urządzeniach elektrotermicznych

**Urządzenia rezystancyjne. Regulacja temperatury w grzejnictwie rezystancyjnym. Nagrzewanie rezystancyjne w przemyśle i ogrzewnictwie. Promienniki podczerwieni.**

**dr inż. Zbigniew Waradzyn**

# Część 1

## Nagrzewanie rezystancyjne

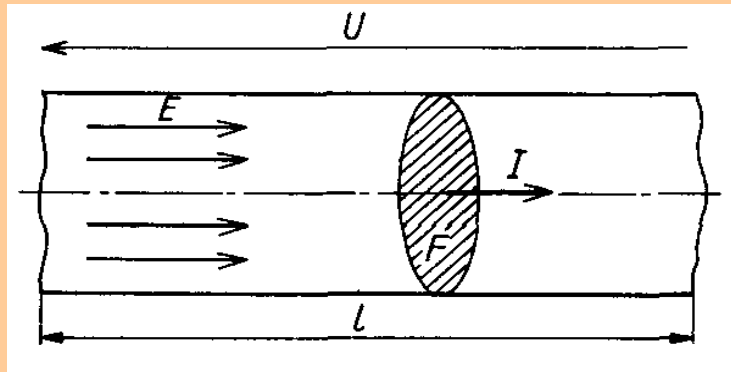
**Nagrzewanie rezystancyjne (oporowe)** jest to nagrzewanie elektryczne wykorzystujące efekt Joule'a (Joule'a-Lenza) w *ośrodku przewodzącym stałym*, połączonym galwanicznie ze źródłem energii.

W nagrzewaniu rezystancyjnym wykorzystuje się prąd przewodzenia polegający na przemieszczaniu się elektronów swobodnych w ośrodku przewodzącym pod wpływem pola elektrycznego.

Wyróżnia się przede wszystkim układy zasilane prądem o częstotliwości sieciowej (u nas 50 Hz) oraz prądem stałym. Możliwa jest też praca przy większych częstotliwościach.

# Moc grzejna

Ograniczamy się do przypadku elementu przewodzącego *jednorodnego* o rezystywności  $\rho$  (która odpowiada konduktywności  $\gamma$ ) i o stałym przekroju  $S$



gdzie

$l$  – długość elementu przewodzącego,  
 $U$  – napięcie na elemencie przewodzącym,  
 $E$  – natężenie pola elektrycznego w elemencie przewodzącym,  
 $I$  – natężenie prądu w elemencie przewodzącym,

Moc grzejna  $P$  wytworzona efektem Joule'a-Lenza w elemencie przewodzącym wynosi  $P = R \cdot I^2$

gdzie rezystancja  $R$  elementu przewodzącego wynosi  $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$

Inna postać wyrażenia określającego moc  $P$  to  $P = \gamma E^2 V$   
gdzie  $V = S \cdot l$  to objętość elementu przewodzącego

# Rys historyczny

Historia rozwoju nagrzewania rezystancyjnego wyprzedza zasady leżące u jego podstaw:

- 1801 r. – nagrzewanie drutu platynowego prądem elektrycznym (L. Tenar),
- 1807 r. – pierwsze laboratoryjne urządzenie rezystancyjne komorowe z nagrzewaniem bezpośrednim wsadu (G. Davy),
- 1827 r. – sformułowanie prawa Ohma,
- 1842 r. – sformułowanie prawa Joule'a-Lenza.

Lata 80-te XIX wieku:

- początek zastosowań przemysłowych,
- pojawienie się pierwszych ogrzewaczy elektrycznych; wyposażono w nie m. in. wagony kolei podziemnych,
- pierwsze narzędzia i przyrządy grzejne powszechnego użytku zostały zaprezentowane na międzynarodowej wystawie elektrotechnicznej w Paryżu w 1881 r.

# Rodzaje nagrzewania rezystancyjnego

Nagrzewanie to może być:

- bezpośrednio,
- pośrednio – najczęściej stosowane.

Urządzenie do nagrzewania rezystancyjnego mogą być:

- bezkomorowe,
- komorowe.

Inny podział urządzeń do nagrzewania rezystancyjnego:

- nieprzelotowe – element nagrzewany pozostaje nieruchomy podczas procesu nagrzewania,
- przelotowe.

# Nagrzewanie rezystancyjne bezpośrednie

W nagrzewaniu rezystancyjnym bezpośrednim prąd przepływa bezpośrednio przez sam wsad powodując jego nagrzewanie.

Cała energia dostarczona do wsadu jest w nim zamieniana na ciepło (przy pominięciu strat cieplnych) podnosząc jego temperaturę.

Nagrzewanie to wymaga zwykle przepływu przez wsad znacznego prądu, który musi przepływać także przez styki łączące źródło zasilania ze wsadem, co przeważnie stanowi poważny problem – dlatego ten rodzaj nagrzewania nie jest zbyt często stosowany.

# Nagrzewanie rezystancyjne bezpośrednie – przykład 1

Pręty stalowe o średnicy 12 mm i długości 8 m są nagrzewane parami (połączenie szeregowo) metodą rezystancyjną bezpośrednią od 20°C do 720°C przy zastosowaniu prądu stałego. Zakładając objętościowe ciepło właściwe wsadu  $c_\gamma$  równe 5 MJ/(m<sup>3</sup>K) i stałą rezystywność wsadu  $\rho$  równą 0,5  $\mu\Omega\text{m}$  wyznaczyć wartość napięcia zasilania, przy której czas nagrzewania prętów wyniesie 1 minutę.

*Rozwiązanie:* Energia potrzebna do nagrzania prętów

$$W = V(c_\gamma)(\theta_2 - \theta_1) = 2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot (c_\gamma)(\theta_2 - \theta_1) = \pi \cdot \frac{(0.012)^2}{2} \cdot 8 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 700 = 6.33 \text{ [MJ]}$$

Rezystancja

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 8}{\frac{\pi \cdot (0.012)^2}{4}} = \frac{32 \cdot 10^{-6}}{144 \cdot 10^{-6} \cdot \pi} = 0.071 \text{ [\Omega]}$$

Energia dostarczona

$$W = I^2 R t \quad \Rightarrow \quad I = \sqrt{\frac{W}{R t}} = \sqrt{\frac{6.33 \cdot 10^6}{0.071 \cdot 60}} = 1220 \text{ [A]}$$

Napięcie zasilania

$$U = IR = 1220 \cdot 0.071 = 86 \text{ [V]}$$





# Nagrzewanie rezystancyjne bezpośrednie – przykład 2

Zadanie podobne do zadania z przykładu 1, z tą różnicą, że pręty stalowe mają długość 0,25 m i średnicę 100 mm oraz są nagrzewane pojedynczo.

*Rozwiązanie:*

Energia potrzebna do nagrzania prętów

$$W = V(c\gamma)(\theta_2 - \theta_1) = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot (c\gamma)(\theta_2 - \theta_1) = \\ = \pi \cdot \frac{(0.1)^2}{4} \cdot 0.25 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 700 = 6.9 \text{ [MJ]}$$

Rezystancja

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.25}{\frac{\pi \cdot (0.1)^2}{4}} = \frac{0.5 \cdot 10^{-6}}{0.01 \cdot \pi} = 15.9 \text{ [\mu\Omega]}$$

Energia dostarczona

$$W = I^2 R t \quad \Rightarrow \quad I = \sqrt{\frac{W}{R t}} = \sqrt{\frac{6.9 \cdot 10^6}{15.9 \cdot 10^{-6} \cdot 60}} = 85000 \text{ [A]}$$

Napięcie zasilania

$$U = IR = 85000 \cdot 15.9 \cdot 10^{-6} = 1.35 \text{ [V]}$$

Wymagane napięcie zasilania jest zbyt niskie (należy jeszcze uwzględnić spadek napięcia na stykach)

*Wniosek:* Nagrzewanie rezystancyjne bezpośrednie nie zawsze można zastosować.



# Nagrzewanie rezystancyjne pośrednie

Zasada działania oparta na układzie dwuelementowym: źródło ciepła – odbiornik ciepła.

**Elementy grzejne** – nieodzowna część każdego urządzenia rezystancyjnego pośredniego – to w nich wydzielają się ciepło.

Nagrzewanie elementu grzejnego to *środek*, *celem* jest dostarczenie energii do odbiornika.

Temperatura elementów grzejnych musi być wyższa niż temperatura odbiornika.

Z powyższego wynika, że nagrzewanie rezystancyjne pośrednie jest mniej ekonomiczne od nagrzewania rezystancyjnego bezpośredniego.

# Nagrzewanie rezystancyjne pośrednie - elementy grzejne

Podstawową częścią elementu grzejnego jest rezystor grzejny.

Podstawowe materiały, z których wykonuje się elementy grzejne:

- stopy rezystancyjne,
- metale wysokotopliwe,
- materiały niemetalowe.

Podział elementów grzejnych ze względu na temperaturę pracy:

- niskotemperaturowe ( $\leq 400$  °C),
- średniotemperaturowe,
- Wysokotemperaturowe ( $\geq 1400$  °C).

# Stopy rezystancyjne na elementy grzejne

Najbardziej rozpowszechnione są stopy **ferchromalowe** FeCrAl (należą do stopów ferrytycznych):

- wysokie dopuszczalne temperatury pracy (do 1400 °C),
- duża trwałość,
- niski współczynnik temperaturowy rezystywności (wzrost rezystywności w przedziale 20 °C ÷ 1200 °C nie przekracza 4 %)

*(Dla porównania: jak zmienia się rezystywność miedzi w zakresie temperatur od 20 °C do temperatury ok. 1000 °C ?*

*Odpowiedź: rośnie ok. 12 razy)*

- stosunkowo niska cena.

Główny producent tych stopów to firma Kanthal (Szwecja) – około 75% światowego zapotrzebowania na ferchromale.

# Stopy rezystancyjne na elementy grzejne - *kanthal A1*

Niektóre parametry stopu *kanthal A1*:

- skład chemiczny: **Fe** – 72,2%, **Cr** – 22%, **Al** – 5,8%,
- rezystywność:  $1,45 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$  przy 20 °C ,

(Dla porównania: ile razy ta rezystywność jest większa niż rezystywność miedzi przy 20 °C?)

*Odpowiedź: ok. 81,5 raza)*

- dopuszczalna temperatura pracy - 1400 °C,
- temperatura topnienia - 1500 °C,
- odporność na korozję,
- współczynnik, przez który należy pomnożyć tę rezystywność, aby uzyskać rezystywność przy 1200 °C to 1,040 (z tablic).

# Metale wysokotopliwe na elementy grzejne

To przede wszystkim W, Mo, Ta oraz Pt (w mniejszym stopniu).

Zaletą – mają wyższe temperatury pracy niż stopy FeCrAl.

Wady:

- bardzo duże współczynniki temperaturowe rezystywności,
- W, Mo i Ta – brak odporności na utlenianie.

**Tablica 13.6. Podstawowe właściwości metali wysokotopliwych**

Nazwa metalu	Rezystywność w 20°C $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Dopuszczalna temperatura pracy, °C	Uwagi
Molibden	0,050	1900	Powyżej 400°C wymagają atmosfery obojętnej, redukcyjnej lub próżni < 0,01 Pa Może pracować w atmosferze utleniającej
Wolfram	0,055	2500	
Tantal	0,125	2400	
Platyna	0,105	1600	

# Materiały niemetalowe na elementy grzejne

Podział na dwie podgrupy:

- niskotemperaturowe ( $\leq 400$  °C),
- wysokotemperaturowe ( $\geq 1400$  °C):
  - ich istotna cecha – silna i nieliniowa zależność rezystywności od temperatury.
  - są też stosowane przy niższych temperaturach.
  - z materiałów rezystancyjnych wysokotemperaturowych w zasadzie wytwarza się gotowe elementy grzejne (nie półprodukty).

# Materiały niemetalowe na elementy grzejne (2)

Niskotemperaturowe ( $\leq 400$  °C)

- na ogół dielektryki (polimery, gumy, kauczuki) z zawartością domieszek o dużej przewodności (proszki metali, sadza, grafit, niektóre półprzewodniki, itp.),

Wysokotemperaturowe ( $\geq 1400$  °C) – np.:

- karborund (SiC) – różne odmiany:
  - rezystywność początkowo maleje z temperaturą, a następnie rośnie (podobnie jest w przypadku grafitu),
  - rezystywność rośnie z czasem („starzenie się”)
- krzemomolibden,
- rzadziej grafit.



# Elementy grzejne niskotemperaturowe

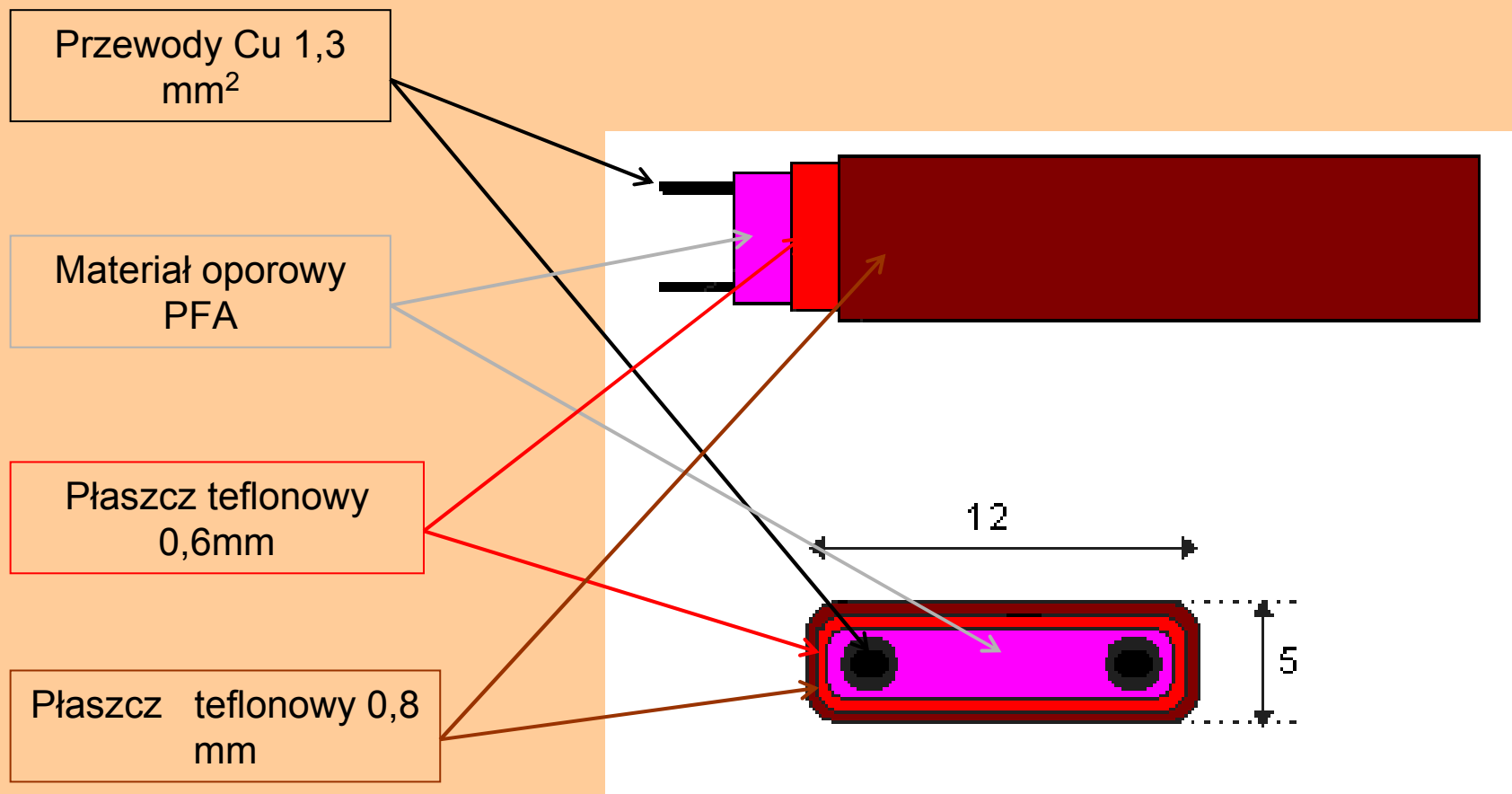
1. Elementy grzejne powierzchniowe – folie metalowe (Al, Cu, Ni, Fe) lub niemetalowe (np. tkaniny z włókna szklanego impregnowane materiałem rezystancyjnym):
  - temperatury pracy  $30 \div 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
  - obciążenia powierzchniowe do  $5 \text{ W/cm}^2$ ,
  - stosowane głównie w celu:
    - zapewnienia równomiernego pola temperatur dużych powierzchni (np. przy ogrzewaniu sufitowym, podjazdów – **szyby samochodowe**, schodów, chodników, elementów samolotów, anten radarowych, zbiorników cieczy),
    - ogrzewaniu ubiorów (butów, skafandrów, itp.).

# Elementy grzejne niskotemperaturowe (2)

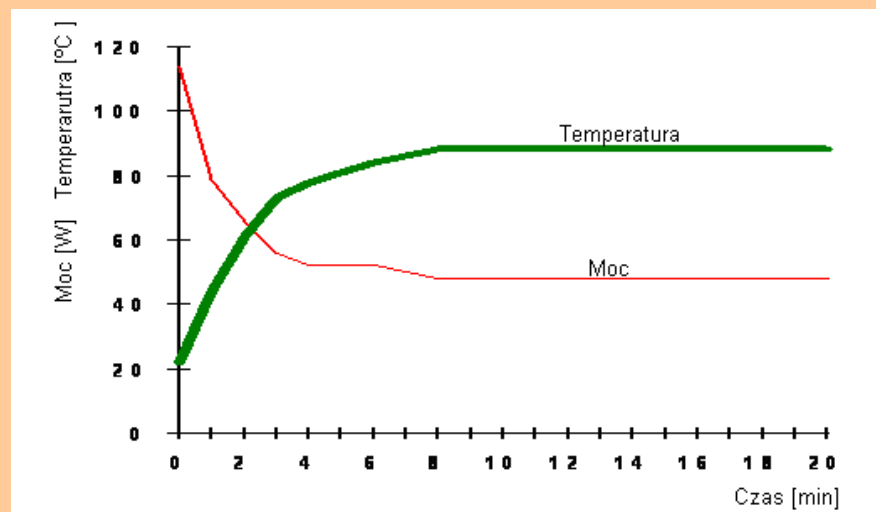
2. Kable grzejne – jeden lub dwa przewody grzejne w odpowiedniej izolacji (np. tworzywa sztuczne, gumy, kauczuki) umieszczone w metalowych płaszczach (Cu, Al, stopy miedziowo-niklowe, itd.):
- średnice kabli do 10 mm,
  - napięcia pracy do 1000 V,
  - gęstość liniowa mocy do 600 W/m.

Tu należą też tzw. **przewody samoregulujące**.

# Budowa przewodów samoregulujących



# Przewody samoregulujące w ogrzewaniu rezystancyjnym



Cechy przewodów grzejnych samoregulujących:

- pobierana moc maleje ze wzrostem temperatury,
- nie przegrzewają się,
- stosowane głównie na zewnątrz budynków,
- ich stosowanie daje oszczędności energii,
- można je ciąć na dowolną długość – oszczędność materiału.

# Elementy grzejne niskotemperaturowe (3)

3. Elementy grzejne rurkowe (tego typu elementy mogą być wykonane także dla zastosowań średniotemperaturowych). Mają rezystory grzejne metalowe w kształcie skrętki izolowanej od płaszcza metalowego.

Dopuszczalna temperatura pracy zależy głównie od materiału płaszcza:

- miedź – do 400 °C,
- stal żaroodporna – 700 ÷ 800 °C.

Zastosowania: suszarki, nagrzewnice przelotowe, ogrzewacze wewnętrzne, ogrzewanie rozjazdów kolejowych, itd.

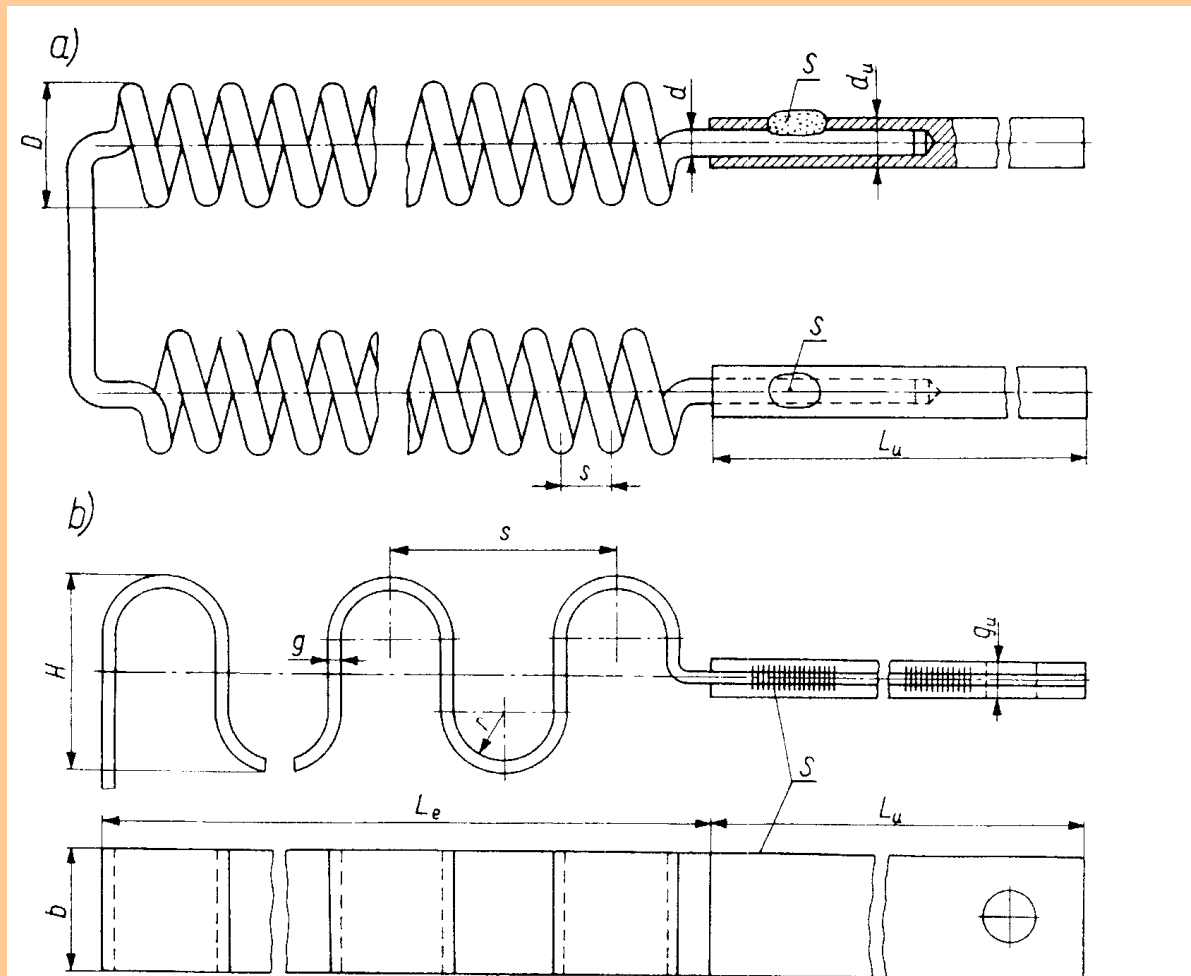
# Elementy grzejne średniotemperaturowe

Wykonane głównie z ze stopów austenitycznych i ferrytycznych.

Standardowe rozwiązania co do kształtu to:

- elementy skrętkowe (spiralne) wykonywane z drutów o przekroju kołowym,
- elementy faliste wykonane z taśmy.

# Elementy grzejne średnio-temperaturowe – skrętki i taśmy



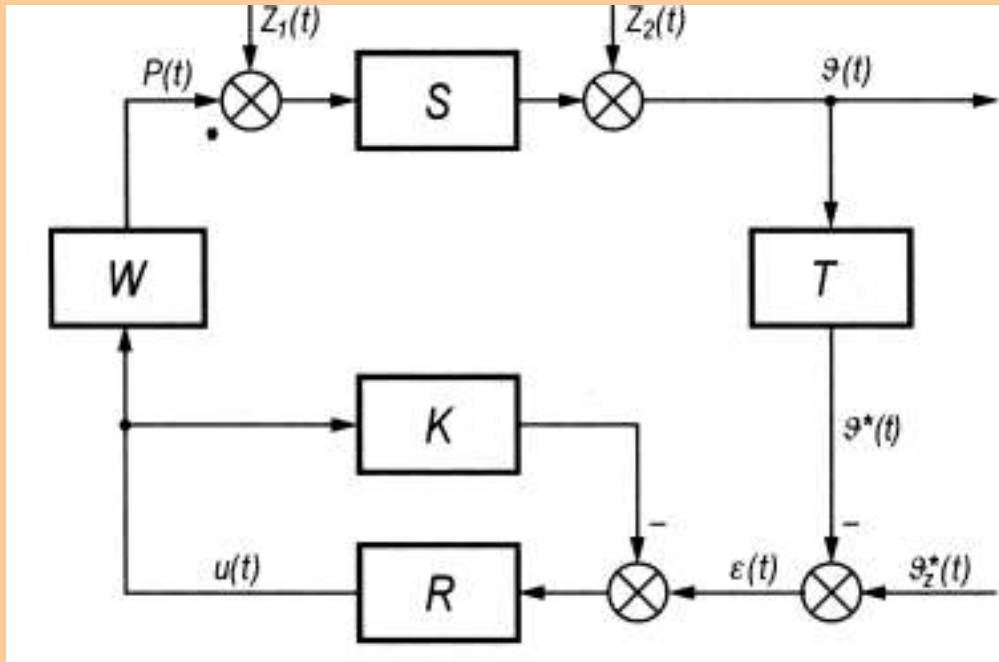
Rys. 13.9. Najbardziej charakterystyczne rodzaje elementów grzejnych średnotemperaturowych, wg [13.12]: a) skrętki; b) taśmy

# Elementy grzejne wysokotemperaturowe – wybrane rozwiązania

1. Elementy wykonywane z metali wysokotopliwych, mają bardzo zróżnicowane konstrukcje: druty, taśmy, pręty.
2. Elementy z karborundu (silit) wykonuje się najczęściej jako pręty lub nacięte spiralnie rury.
3. Elementy grafitowe (np. rury, pręty, tygle, płyty, taśmy).  
Mogą pracować przy bardzo wysokich temperaturach:
  - w atmosferze ochronnej lub próżni - do 2500 °C,
  - w helu do 3000 °C.Napięcia zasilania – kilka do kilkudziesięciu woltów,  
Prądy – do kilku kiloamperów.



# Regulacja temperatury



Rozróżnia się regulację:

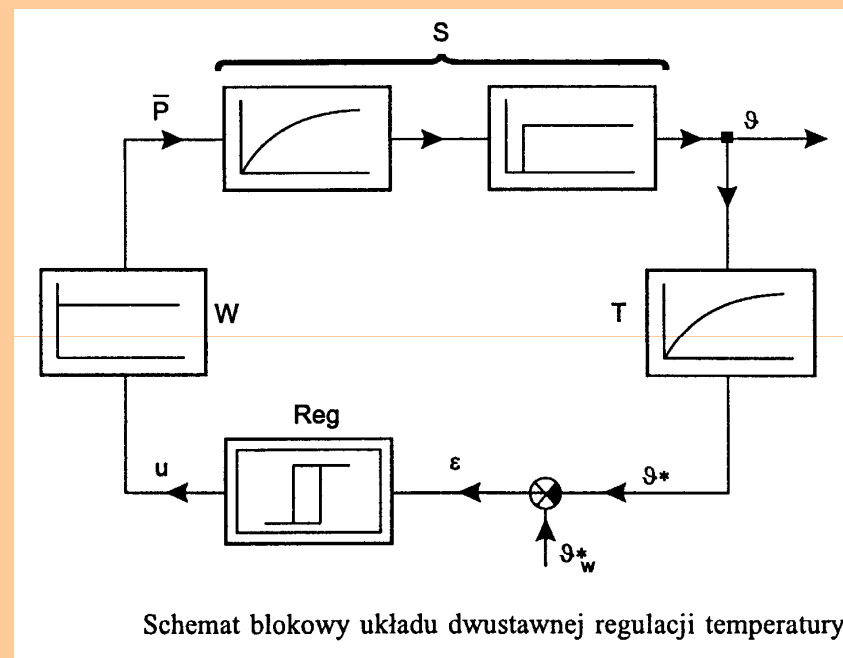
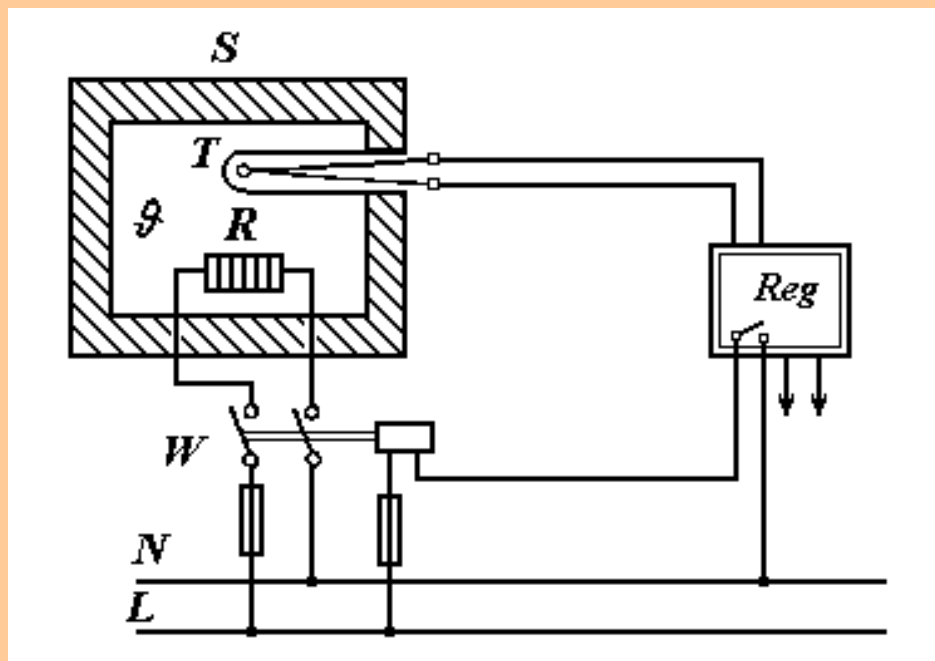
- nieciągłą (dwustawna, trójstawna - rzadziej),
- niby-ciągłą (dodatkowe układy korekcyjne),
- ciągłą (najczęściej regulacja PID).

## Schemat blokowy zamkniętego układu regulacji temperatury

$S$  - obiekt regulacji,  $T$  - czujnik temperatury,

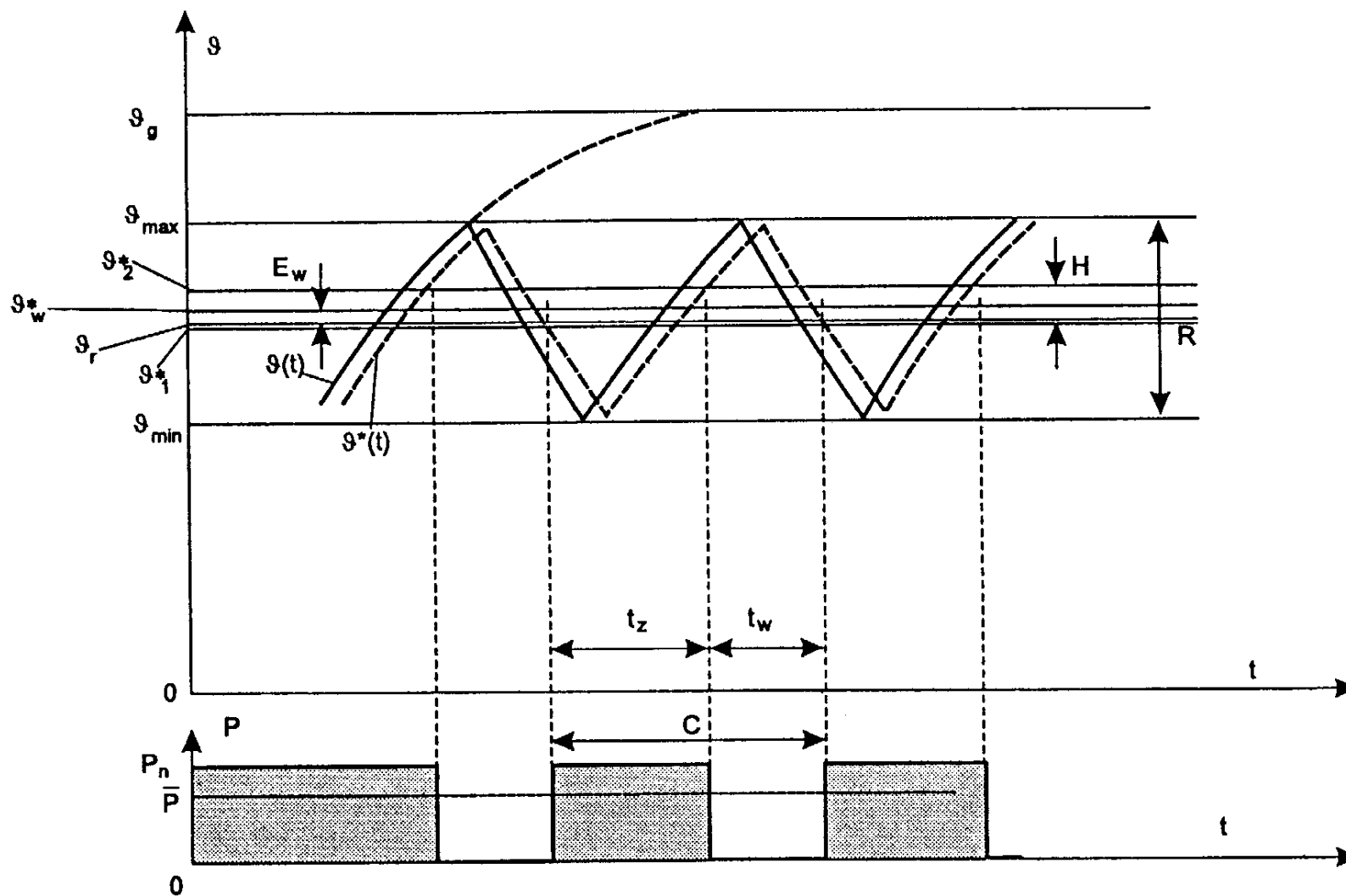
$R$  - regulator,  $K$  - korektor,  $W$  - człon wykonawczy

# Układ i schemat blokowy dwustawnej regulacji temperatury



- $S$  – komora urządzenia rezystancyjnego pośredniego komorowego,
- $R$  – element grzejny,
- $T$  – czujnik temperatury,
- $Reg$  – regulator
- $W$  - stycznik

# Przebieg temperatury w regulacji dwustawnej



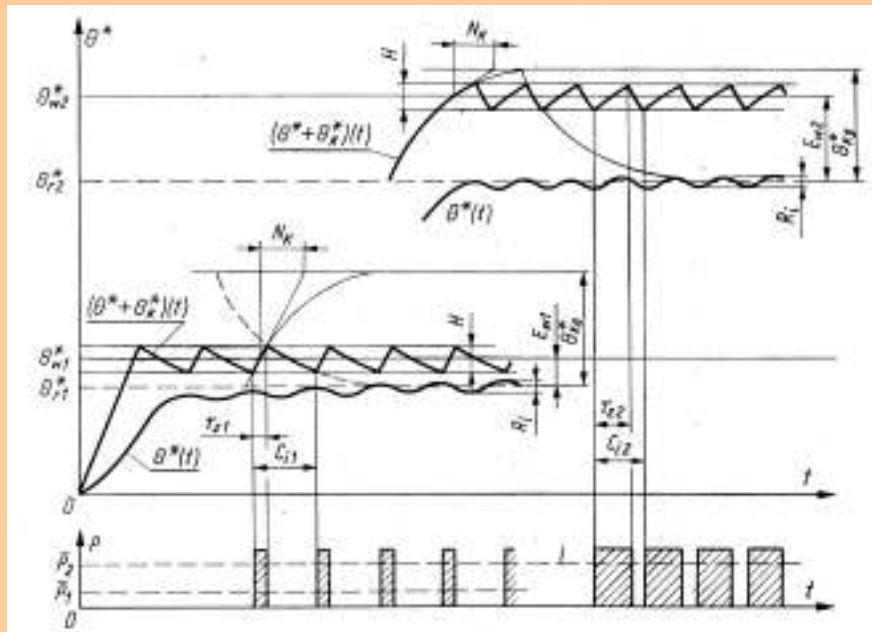
Przebiegi temperatur i mocy w stanie oscylacji ustalonych regulacji dwustawnej

# Regulacja niby-ciągła

Podstawowa różnica w stosunku do regulacji dwustawnej – układ zawiera korektor (patrz slajd *Regulacja temperatury*).

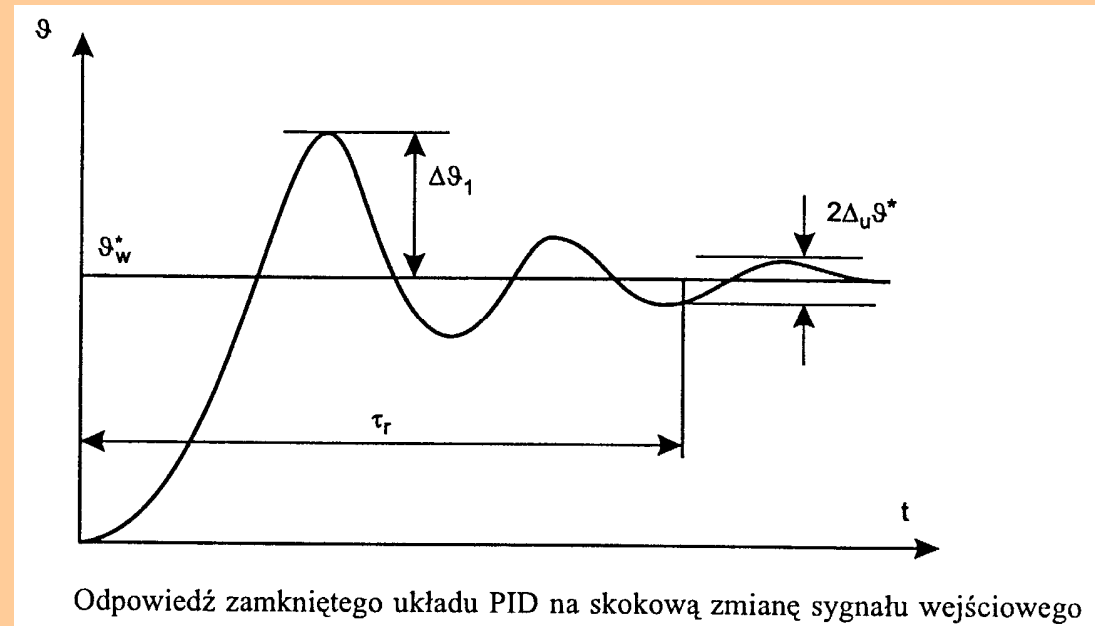
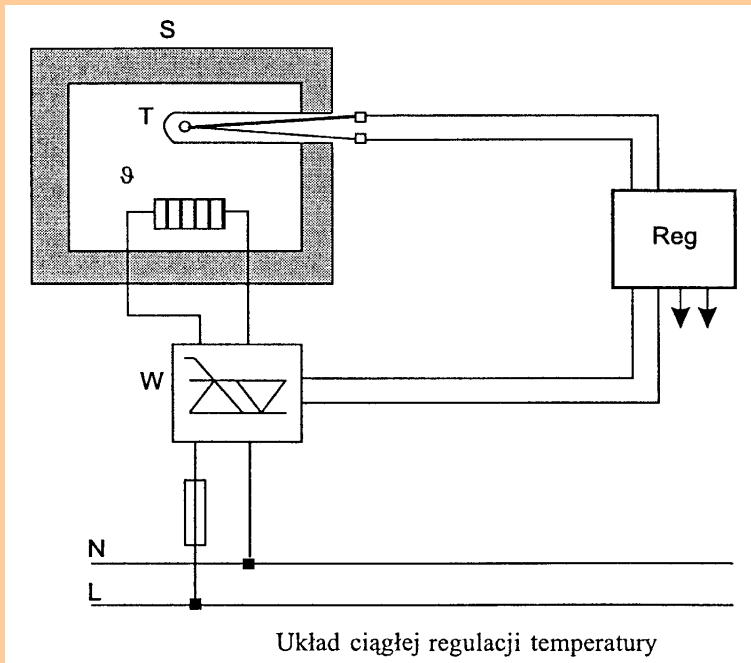
Sygnał z korektora sumuje się z sygnałem z czujnika temperatury, co powoduje, że sumaryczny sygnał wejściowy regulatora znacznie wyprzedza sygnał proporcjonalny do temperatury w piecu.

Skutkiem tego ustala się dużo większa częstotliwość łączeń niż przy regulacji dwustawnej oraz dużo mniejsza amplituda oscylacji temperatury.



Wadą układu jest występowanie różnicy pomiędzy temperaturą nastawioną a uzyskaną. Problem można rozwiązać prosto – korygując odpowiednio wartość temperatury zadanej.

# Regulacja ciągła - układ i przykładowy przebieg temperatury



Elementem wykonawczym jest tu triak – umożliwia płynną regulację mocy dostarczanej do elementu grzejjego.

Regulacja ciągła umożliwia uzyskanie najmniejszych oscylacji temperatury – najwyższa jakość regulacji.

# Regulator PID

Napięcie wyjściowe regulatora PID:

$$u(t) = K_R \varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

gdzie

$\varepsilon(\tau)$  - uchyb,

$K_R$  - współczynnik wzmocnienia,

$T_I$  - czas zdwojenia,

$T_D$  - czas wyprzedzenia

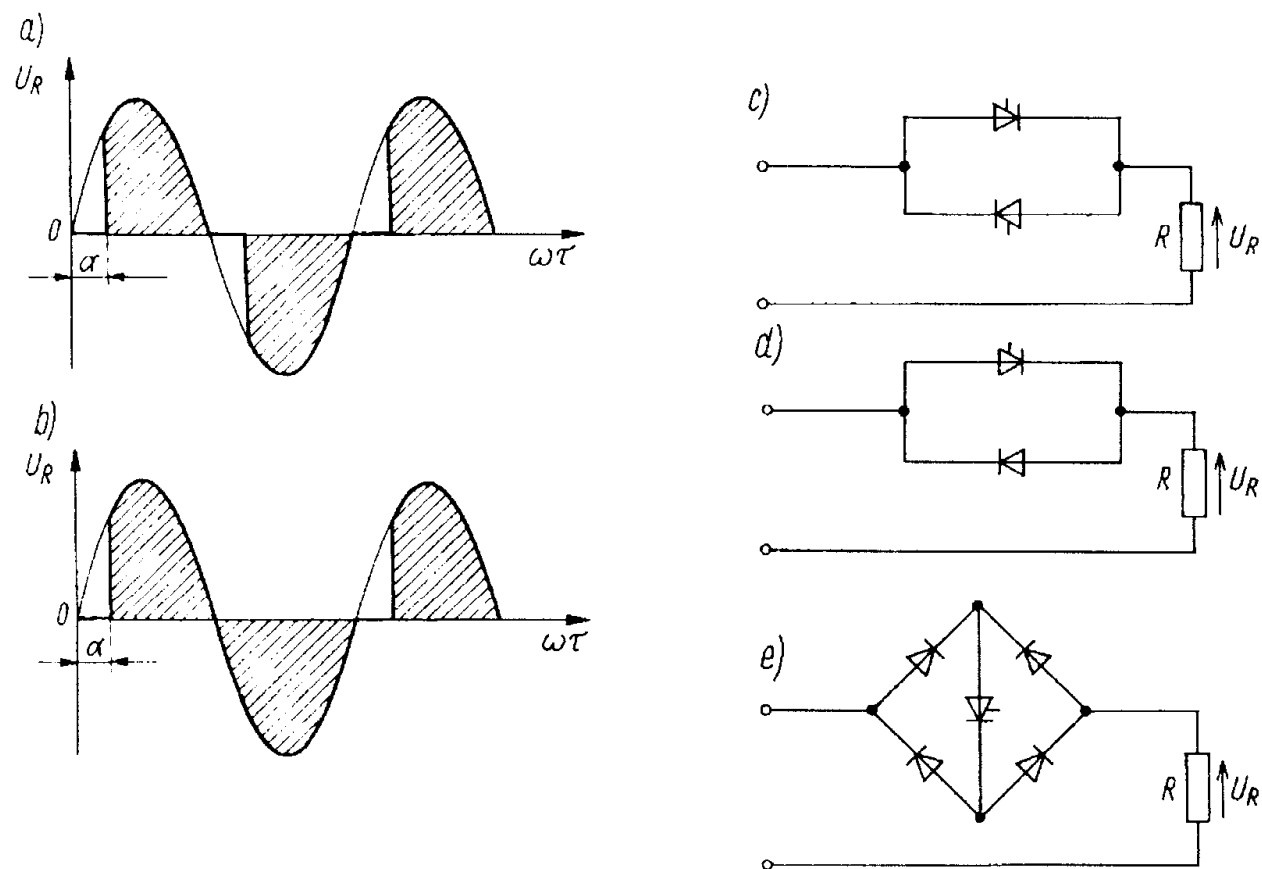
Prawidłowa praca regulatora wymaga odpowiedniego doboru parametrów  $K_R$ ,  $T_I$  oraz  $T_D$  – nastawy regulatora.

# Regulatory adaptacyjne

Przykładowe układy takich regulatorów :

- układy z programowym doborem nastaw  
(ang. *gain scheduling*)
- układy z automatycznym doborem nastaw  
(ang. *auto-tuning*)

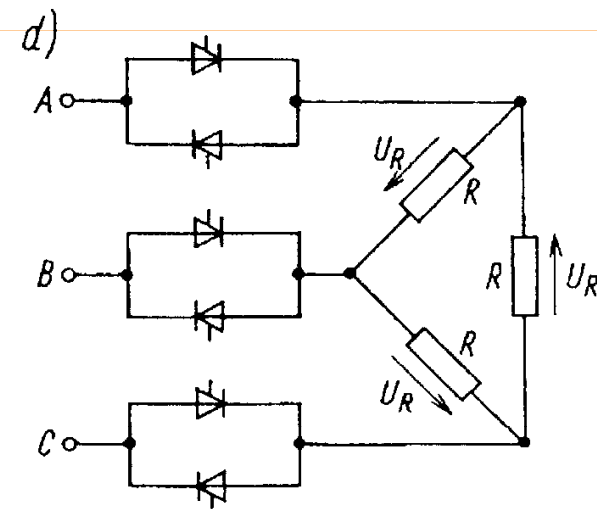
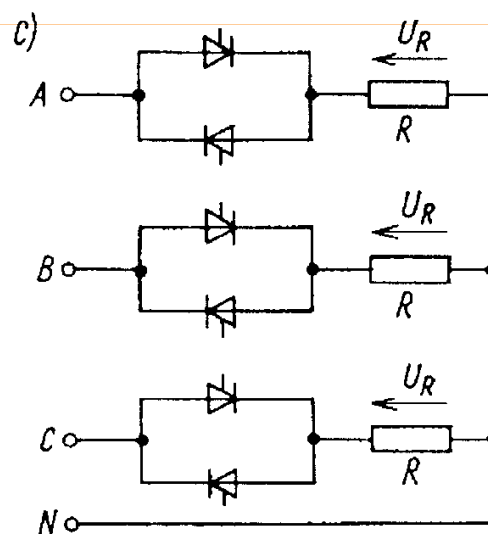
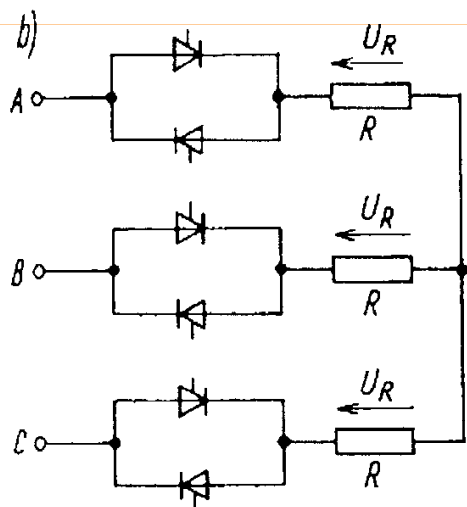
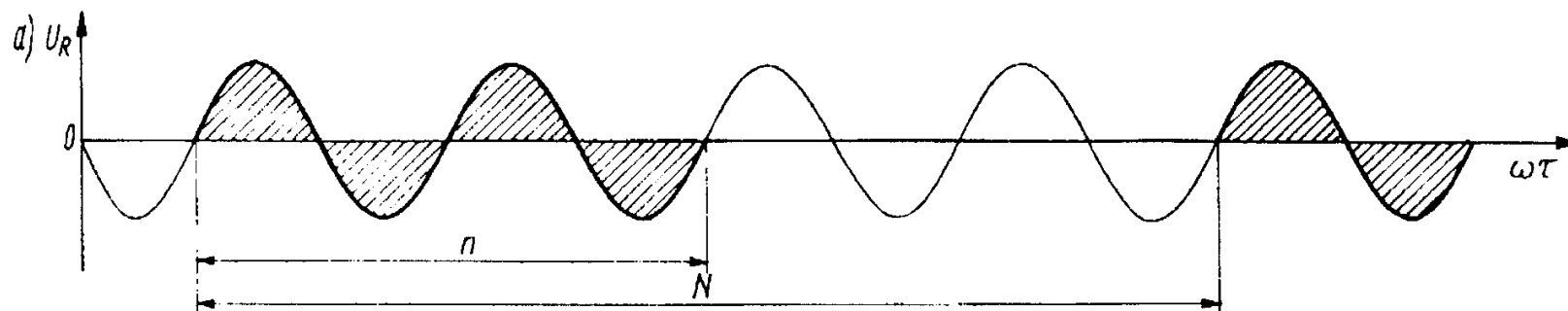
# Sterowanie fazowe



**Rys. 2.89.** Sterowanie tyrystorowe obiektów o małej mocy: a) regulacja fazowa w zakresie mocy  $0 \div P_n$ ; b) regulacja fazowa w zakresie mocy  $0,5P_n \div P_n$ ; c) sterownik w układzie odwrotnie równoległym ( $P_z = 0 \div P_n$ ); d) sterownik w układzie odwrotnie równoległym z diodą ( $P_z = 0,5P_n \div P_n$ ); e) sterownik w układzie mostkowym ( $P_z = 0 \div P_n$ )

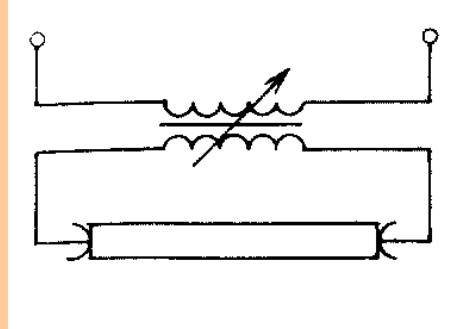


# Sterowanie impulsowe (grupowe)



Sterowniki tyrystorowe w układzie odwrotnie-równoległym obiektów dużej mocy: a) regulacja impulsowa; b) układ gwiazdowy; c) układ gwiazdowy z przewodem zerowym; d) układ trójkątowy

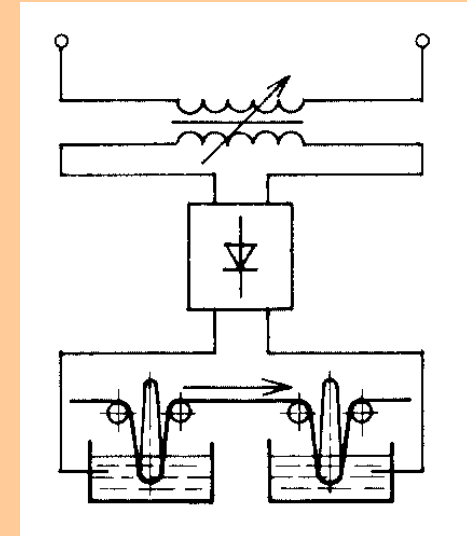
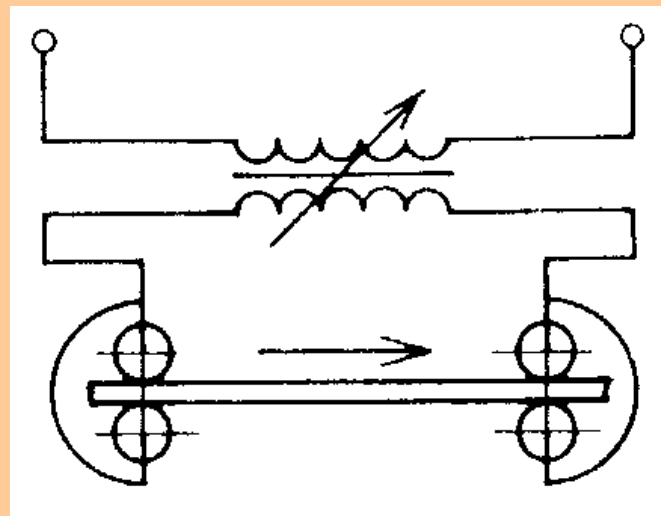
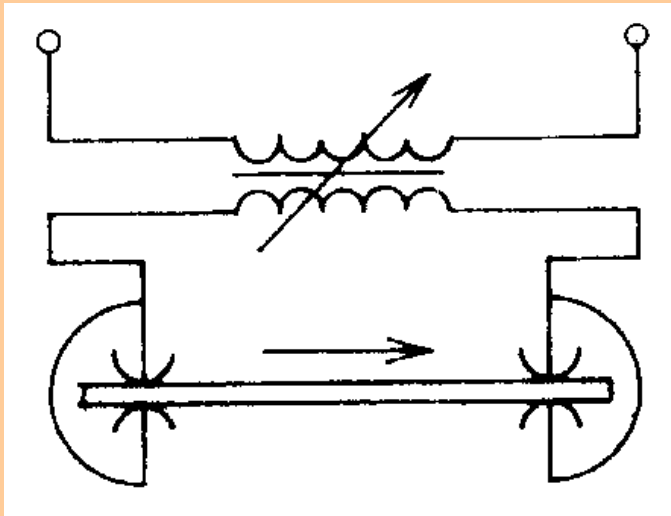
# Urządzenia bezkomorowe nieprzelotowe – zastosowania [2]



- wsad (np. kęsy, pręty, wałki) jest mocowany w szczękach (styki elektryczne) nagrzewnicy,
- główne zastosowanie – szybkie skrośne nagrzewanie elementów metalowych w procesach obróbki plastycznej,
- moce urządzeń – do 12 MV·A,
- napięcia pracy – 5 ÷ 150 V,
- prądy – do 130 kA,
- może być konieczne zastosowanie baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej (stosunkowo duże indukcyjności toru wielkoprądowego).

# Urządzenia bezkomorowe przelotowe [2]

- wsad przesuwa się między stykami elektrycznymi nagrzewnicy (styki ślizgowe, rolkowe lub cieczowe),



- główne zastosowanie – szybkie skrośne nagrzewanie w procesach obróbki cieplnej i plastycznej drutów (średnica do 25 mm) i taśm,
- moce urządzeń – do 800 kV·A,
- możliwość realizacji procesu w atmosferze ochronnej.

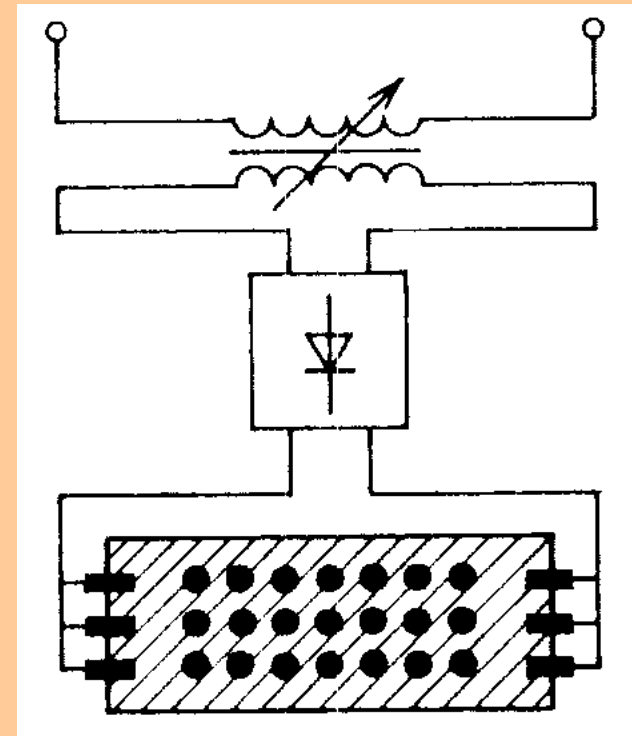
# Urządzenia rezystancyjne bezpośrednie komorowe [2]

Należą tu urządzenia do produkcji wyrobów grafitowych i karborundu.

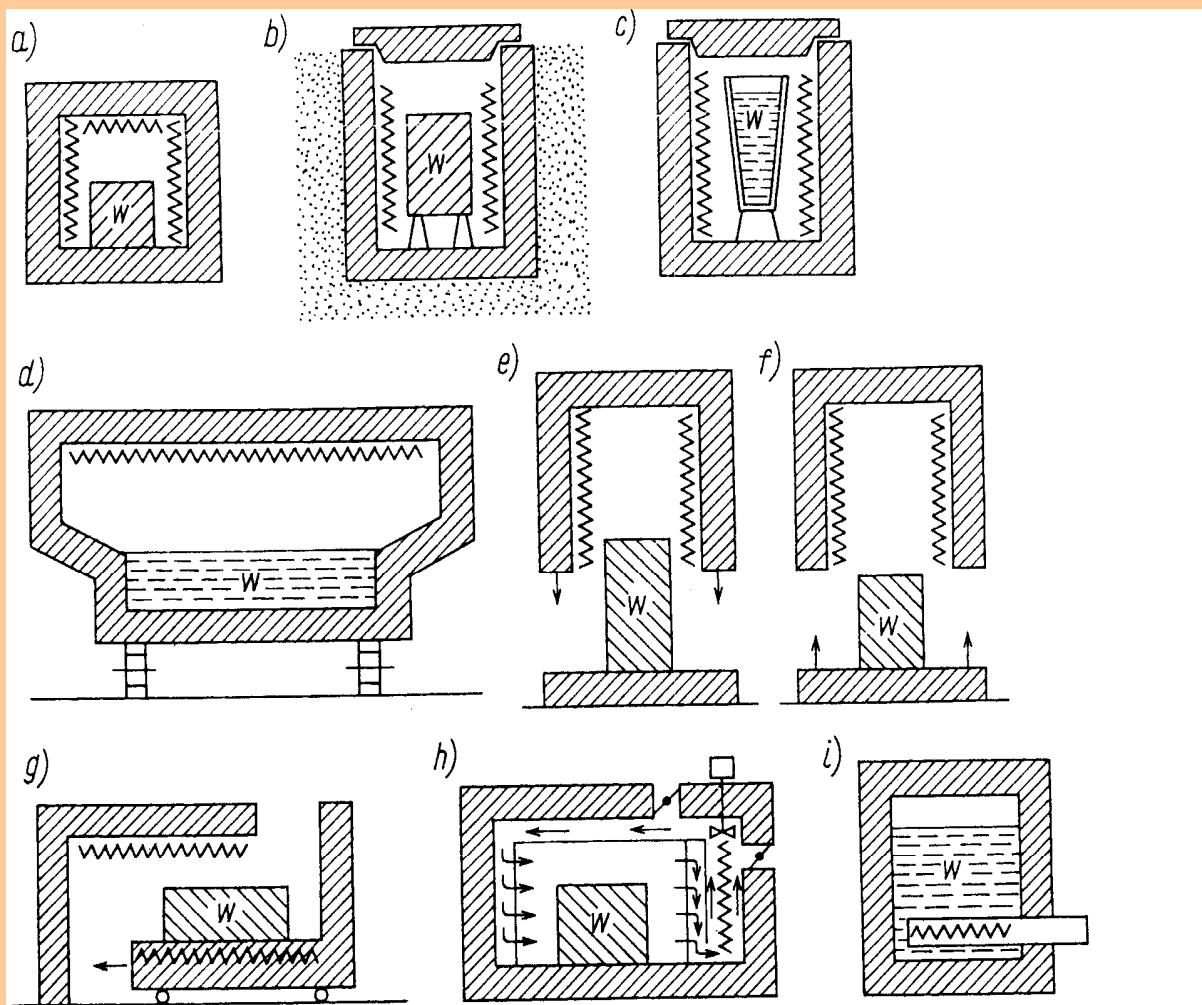
Najbardziej rozpowszechnione są urządzenia z piecami Achesona (rysunek) do grafityzacji wyrobów węglowych w celu nadania im struktury krystalicznej grafitu.

Parametry tych urządzeń:

- moce do 20 MV·A,
- prądy maksymalne – 100 kA,
- temperatury w rdzeniu pieca – do 2800 °C.

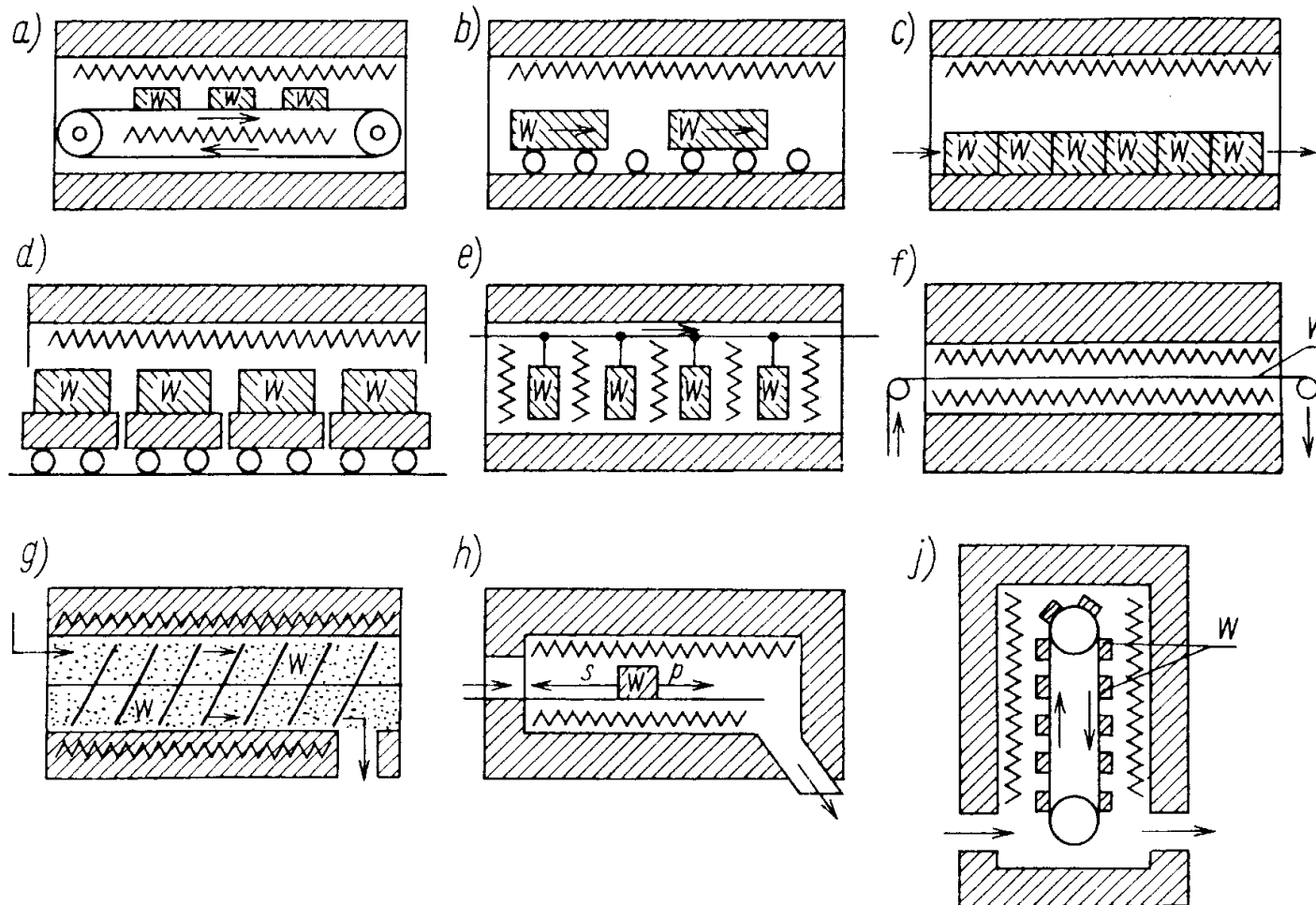


# Piece rezystancyjne pośrednie nieprzelotowe



Rys. 13.12. Schematy bardziej rozposzechnionych pieców rezystancyjnych pośrednich nieprzelotowych:  
a) komorowy; b) wgłębny; c) tyglowy; d) wannowy; e) kołpakowy; f) elewatorowy; g) wysuwny; h) komorowy z wymuszonym ruchem powietrza; i) warknik; W — wsad

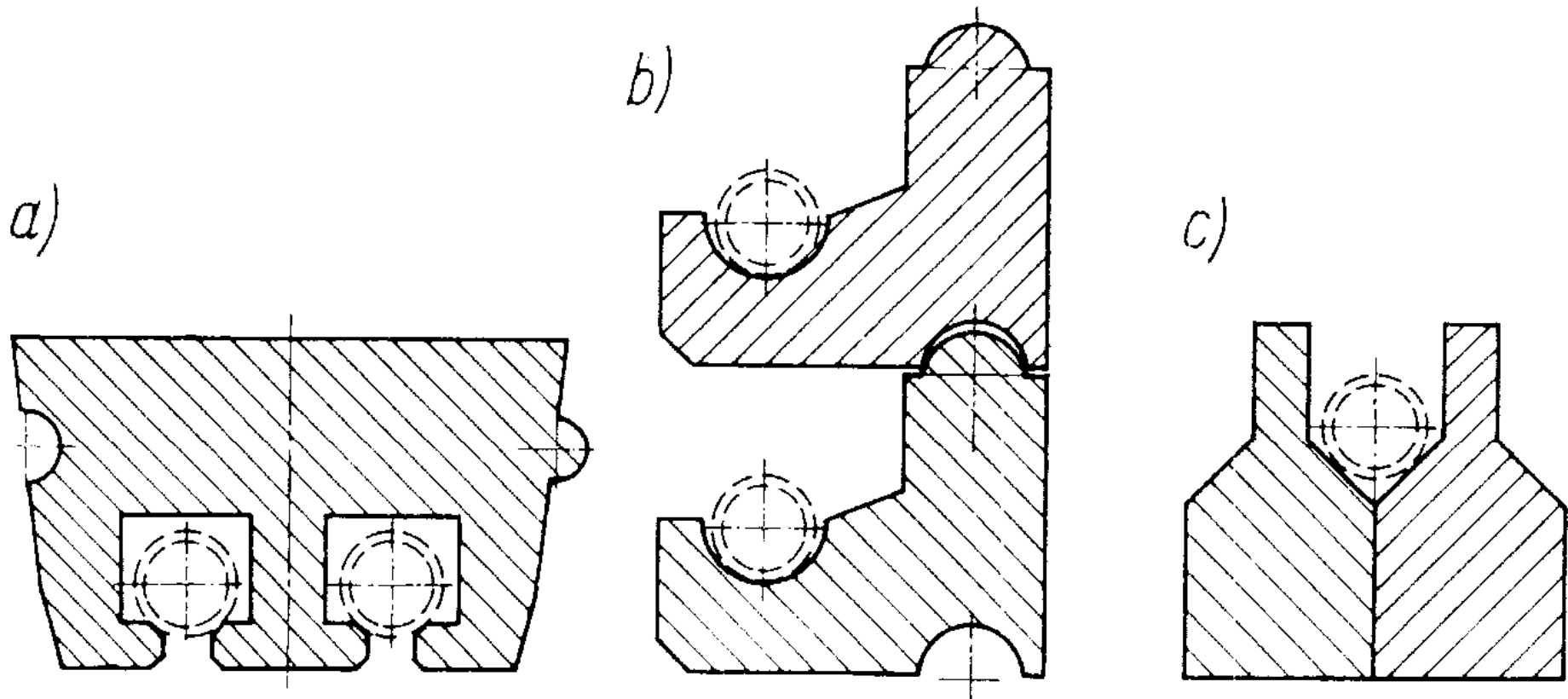
# Piece rezystancyjne pośrednie przelotowe



[2]

Rys. 13.13. Schematy bardziej rozposzechnionych pieców rezystancyjnych pośrednich przelotowych: a) taśmowy; b) rolkowy; c) przepychowy; d) wózkowy (przetokowy); e) przenośnikowy; f) przewłokowy; g) ślimakowy; h) wstrząsowy; i) okrężny z pionową komorą  
*W* — wsad, *s* — ruch szybki, *p* — ruch wolny

# Typowe kształtki wsporcze elementów spiralnych



Rys. 13.14. Typowe kształtki wsporcze elementów spiralnych:  
a) stropowa dwukanałowa; b) boczna; c) denna

# Urządzenia rezystancyjne pośrednie bezkomorowe

Są to urządzenia, w których ciepło wydzielające się w elementach cieplnych jest przekazywane do ośrodków nagrzewanych nie umieszczonych w komorach. W zależności od sposobu przepływu ciepła wyróżnia się:

- urządzenia kondukcyjne (dominuje przewodzenie ciepła),
- urządzenia konwekcyjne (dominuje unoszenie ciepła),
- urządzenia akumulacyjne.



# Urządzenia rezystancyjne pośrednie bezkomorowe kondukcyjne

Zastosowania:

- nagrzewanie części maszyn, np. form do tworzyw, walców do tworzyw sztucznych, itd.,
- ogrzewanie ciągów komunikacyjnych, np. odcinków jezdni i schodów, pochylni, pasów startowych, itd.,
- ogrzewanie rozjazdów kolejowych,
- ogrzewanie rurociągów, zbiorników, rynien i spustów dachowych,
- ogrzewanie wnętrz (ogrzewanie sufitowe, podłogowe, ścienne z zastosowaniem kabli lub tapet grzejnych),
- przyrządy i narzędzia grzejne powszechnego użytku (kuchenki, poduszki elektryczne, lutownice, żelazka, itp.).

# **Urządzenia rezystancyjne pośrednie bezkomorowe konwekcyjne**

Dominujący sposób przekazywanie ciepła to unoszenie swobodne lub wymuszone.

Zastosowania – głównie nagrzewnice przepływowe gazów i cieczy.

Stosowane elementy – wyłącznie elementy grzejne metalowe w postaci skrętek, taśm, elementów rurkowych.

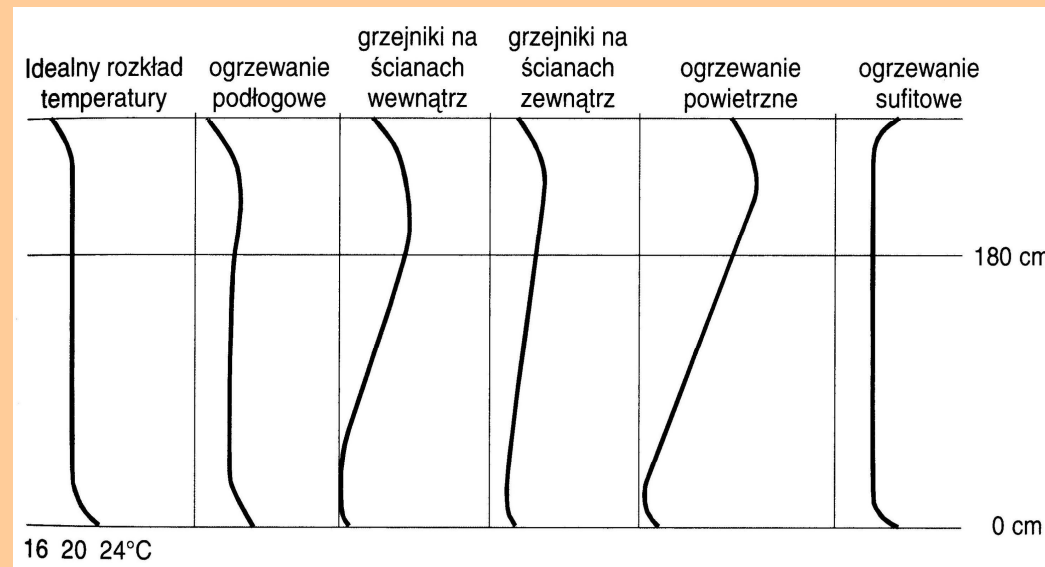
# Urządzenia rezystancyjne pośrednie bezkomorowe akumulacyjne

Są to urządzenia, których cechą znamioną jest duża akumulacyjność – możliwość magazynowania energii poza szczytem energetycznym i jej oddawanie w okresie szczytu dobowego.

- zastosowanie – głównie ogrzewnictwo.
- ciepło jest gromadzone w masywnym rdzeniu (na ogół z magnezytu), temperatura sięga 700 °C [3],
- możliwość statycznego lub dynamicznego rozładowania ciepła,
- moce od kilku do kilkunastu kilowatów.

# Rozkład temperatury w pomieszczeniu

Dla zapewnienia komfortu cieplnego istotne jest, aby temperatura w całym powietrzu **w poziomie** była możliwie równomierna.

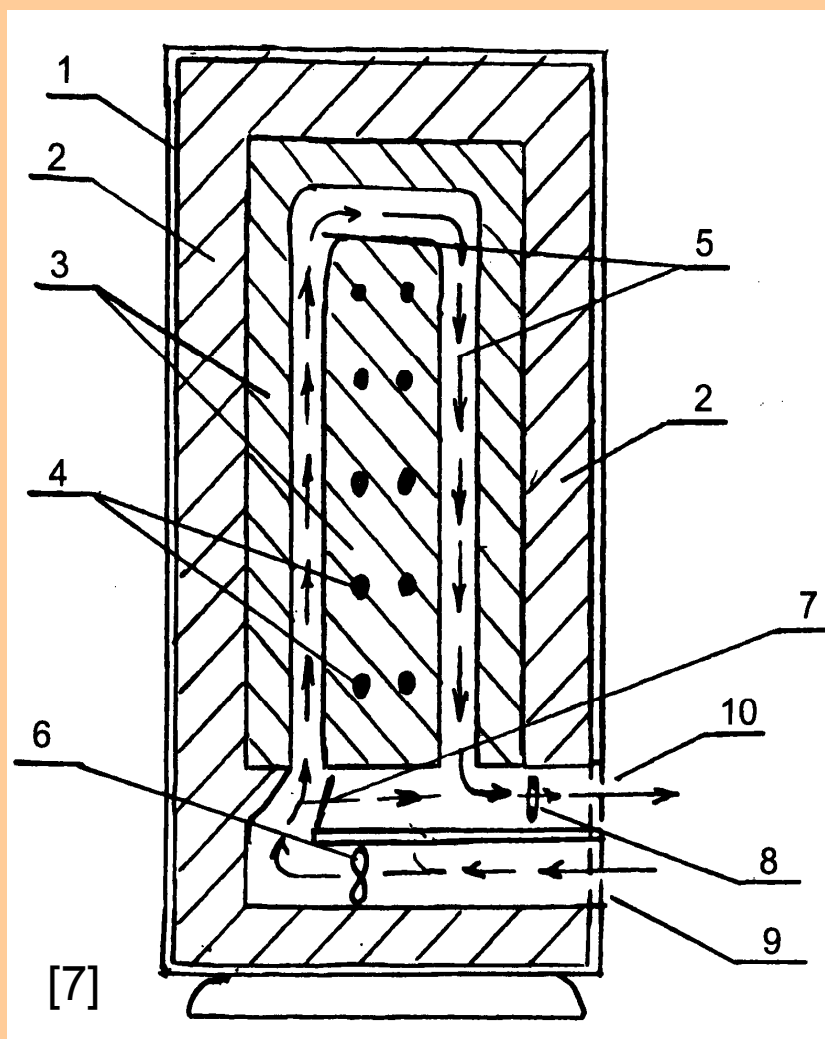


Pionowy rozkład temperatury w pomieszczeniu

Rozkład temperatury w pionie najbardziej zbliżony do optymalnego fizjologicznego (najwyższa temperatura na dole i najniższa na górze) uzyskuje się przy ogrzewaniu podłogowym.

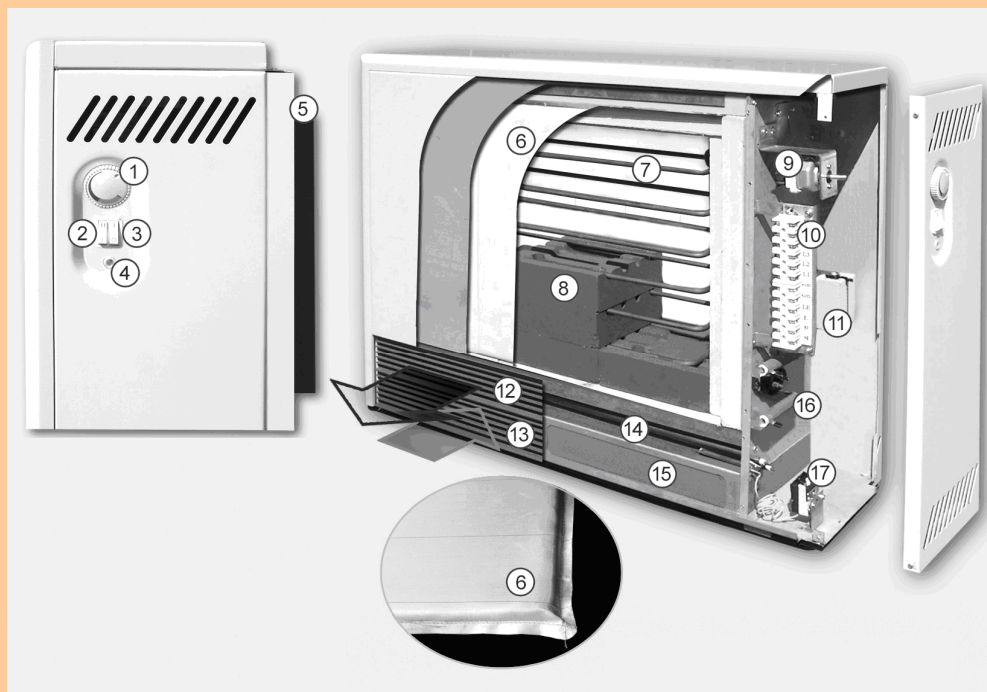
# Ogrzewacz akumulacyjny z dynamicznym rozładowaniem

Energia jest pobierana z sieci w okresie poza-szczytowym i oddawana wg potrzeby.



- 1 – obudowa,
- 2 – izolacja termiczna,
- 3 – blok akumulacyjny,
- 4 – elementy grzejne,
- 5 – kanał powietrzny,
- 6 – wentylator,
- 7 – regulator temperatury powietrza wylotowego,
- 8 – dodatkowy grzejnik,
- 9 – wlot zimnego powietrza,
- 10 – wylot powietrza ogrzanego.

# Ogrzewacz akumulacyjny z dynamicznym rozładowaniem

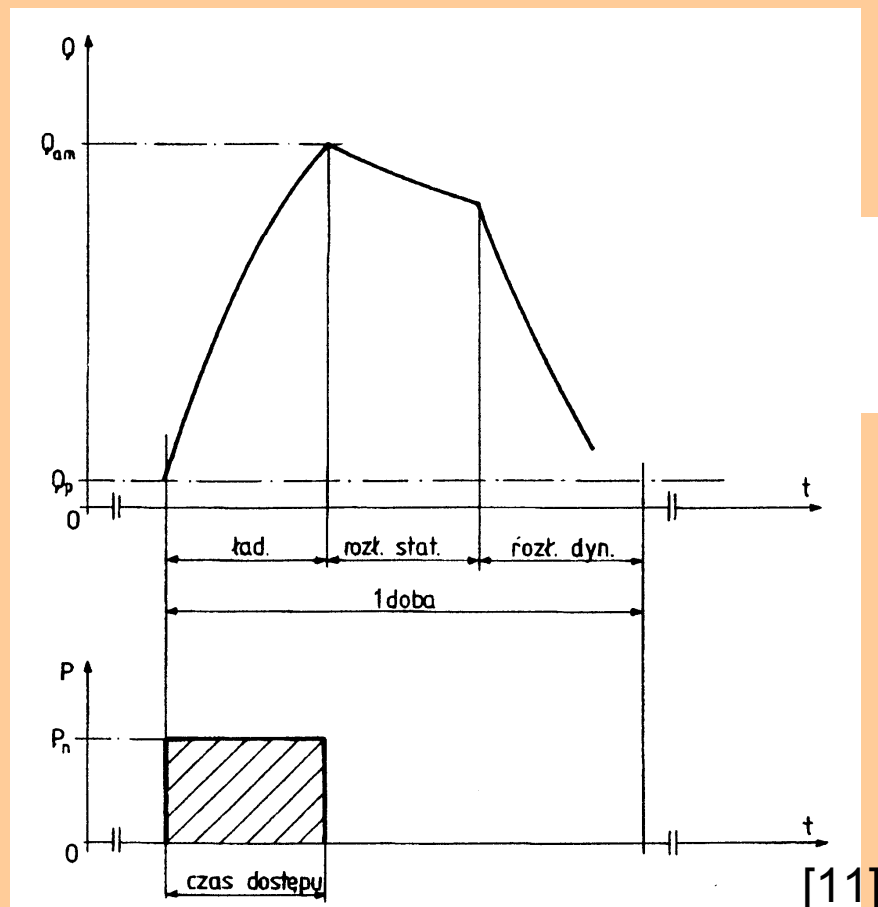


- 1 - pokrętło regulatora ładowania,
- 2 - wyłącznik dodatkowego elementu grzejnego, 3 - regulacja wydajności wentylatora, 4 - lampka kontrolna,
- 5 - kratka dystansowa na tylnej ścianie,
- 6 - izolacja cieplna (microtherm),
- 7 - rurkowe elementy grzejne, 8 - blok akumulacyjny (feolit), 9 - regulator ładowania, 10 - listwa przyłączeniowa,
- 11 - opornik ładowania pogodowego,
- 12 - wylot nagrzanego powietrza,
- 13 - wlot chłodnego powietrza,
- 14 - dodatkowy element grzejny,
- 15 - wstępny filtr powietrza, 16 - opornik wentylatora, 17 - ogranicznik temperatury dodatkowego elementu grzejnego

[8]

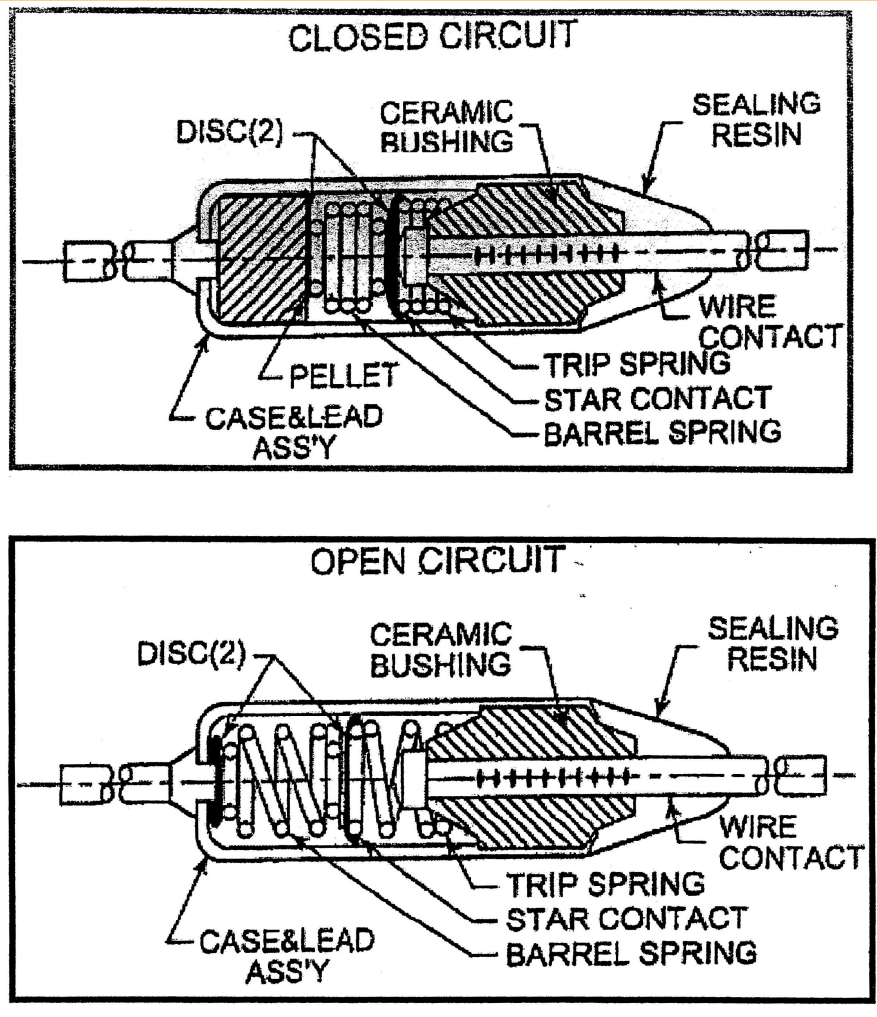


# Energia zgromadzona w ogrzewaczu z dynamicznym rozładowaniem



Zastosowanie „regulatora pogodowego” umożliwia predykcję ilości koniecznej energii (stopnia naładowania ogrzewacza) w zależności od temperatury zewnętrznej, co daje ograniczenie zużycia energii elektrycznej do koniecznego minimum.

# Bezpieczniki termiczne



Takie bezpieczniki mogą być montowane wewnątrz rurkowych elementów grzewczych.

W razie przekroczenia temperatury dopuszczalnej następuje przerwanie ciągłości obwodu wewnątrz bezpiecznika w sposób trwały – element grzewczy nie nadaje się już do użytku.

Taki bezpiecznik ma zadziałać tylko w sytuacjach awaryjnych.

Budowa bezpiecznika termicznego: a) sprawny b) po przekroczeniu temperatury



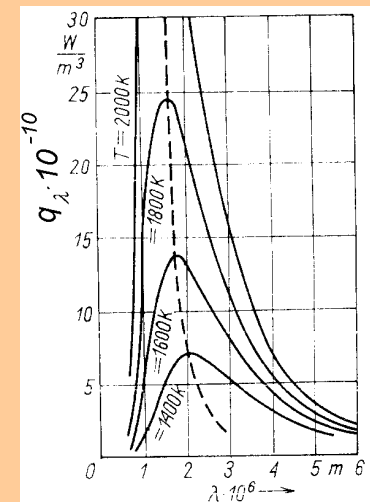
# Część 2

## Nagrzewanie promiennikowe

**Nagrzewanie promiennikowe** jest to nagrzewanie elektryczne oparte na zjawisku **promieniowania temperaturowego** i **luminescencyjnego** emitowanego przez specjalnie do tego celu zbudowane źródła promieniowania.

### Promieniowanie temperaturowe:

- jest wysyłane przez każde ciało o temperaturze większej od zera bezwzględnego,
- *widmo* tego promieniowania jest *ciągłe*,
- maksimum zdolności emisyjnej zależy od temperatury ciała.



Zależność monochromatycznej gęstości strumienia promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne ( $\epsilon_\lambda = 1$ ) od długości fali  $\lambda$  przy stałych temperaturach  $T$

# Promieniowanie luminescencyjne

LUMINESCENCJA [łac.] - zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego przez atomy i cząsteczki podczas ich przejścia ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego lub do stanu wzbudzonego o niższej energii, stanowiącego nadwyżkę nad promieniowaniem cieplnym ciała.

**Promieniowanie luminescencyjne** *nie jest wywołane ciepłem, lecz innym* rodzajem energii wzbudzającej, np. fotoluminescencja, elektronoluminescencja, elektroluminescencja, sonoluminescencja, tryboluminescencja, chemiluminescencja (w tym bioluminescencja).

Źródło promieniowania może emitować:

- wyłącznie promieniowanie temperaturowe,
- promieniowanie temperaturowe i luminescencyjne,
- tylko promieniowanie luminescencyjne (rzadko spotykane).

# Nagrzewanie promiennikowe - przemiany energii

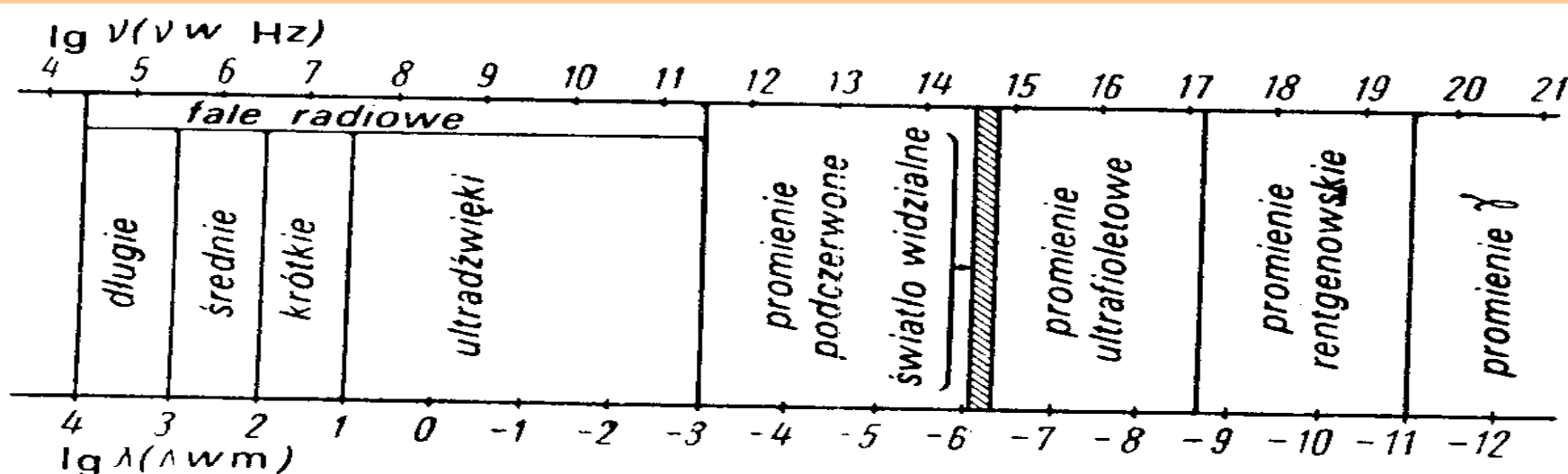
Konwersje energii:

- energia elektryczna → ciepła (w źródle promieniowania),
- energia ciepła → energia promieniowania (*inkadescencja* – w źródle promieniowania),
- energia promieniowania → energia ciepła (wsad – odbiornik promieniowania).

W tym nagrzewaniu promieniowanie może być:

- wyłącznie podczerwone,
- z dominującym udziałem podczerwonego (dodatkowo także widzialne),
- ultrafioletowe z udziałem innych zakresów widma.

# Zakresy promieniowania



**Rys. 3.8** (źródło: Jaworski "Kurs Fizyki 3")

Zakresy promieniowania:

- *podczerwone*: od  $0,78 \mu\text{m}$  do  $1 \text{ mm}$  (ciała o temperaturze pokojowej emitują najwięcej promieniowania o długości fali rzędu  $10 \mu\text{m}$ ),
- *widzialne*: od  $0,38 \mu\text{m}$  (fiolet) do  $0,78 \mu\text{m}$  (czerwień),
- *ultrafioletowe (nadfiolet)*: od  $0,01 \mu\text{m}$  do  $0,38 \mu\text{m}$  = od  $10 \text{ nm}$  do  $380 \text{ nm}$ .

W nagrzewaniu promiennikowym wykorzystuje się zakres promieni o długości fali  $0,16 - 10 \mu\text{m}$  [1].

# Promienniki – c.d.

Promienniki przekazują energię do otoczenia nie tylko przez promieniowanie, ale też przez kondukcję i konwekcję, przy czym udział radiacji nie powinien być mniejszy niż 50%.

# Nagrzewanie promiennikowe (2)

Wielu autorów wlicza tę metodę do rezystancyjnej.

Za wyodrębnieniem metody przemawiają [1]:

- odmienne rozwiązania konstrukcyjne znacznej części urządzeń promiennikowych w porównaniu z rezystancyjnymi,
- konieczność zaliczenia do źródeł promieniowania także lamp wyładowczych działających na zasadzie innej niż przetworniki rezystancyjne.

Powszechnie utożsamia się nagrzewania promiennikowe z nagrzewaniem podczerwienią. Jest to tylko częściowo słuszne, gdyż:

- często znaczny udział ma promieniowanie widzialne emitowane dodatkowo przez promiennik i zamieniane na ciepło we wsadzie,
- żarówki zaliczane do źródeł światła emitują większą moc w podczerwieni i bywają czasem używane w charakterze promienników podczerwieni.

# Techniczne źródła promieniowania (promienniki elektryczne) - ogólne

Promienniki składają się z dwu podstawowych elementów:

- emitującego promieniowanie,
- kierującego promieniowanie w żądanym kierunku.

Element emitujący promieniowanie może mieć charakter:

- konstrukcyjny (część promiennika) – najczęstszy przypadek,
- funkcjonalny (przestaje istnieć po ustaniu pracy promiennika) – np. plazma łuku elektrycznego.

Elementem kierującym promieniowanie może być:

- sam element emitujący promieniowanie,
- odrębna część promiennika (zwana odbłyśnikiem) odbijająca i promieniowanie kierująca go do określonego kąta bryłowego.

# Podział promienników ze względów konstrukcyjnych

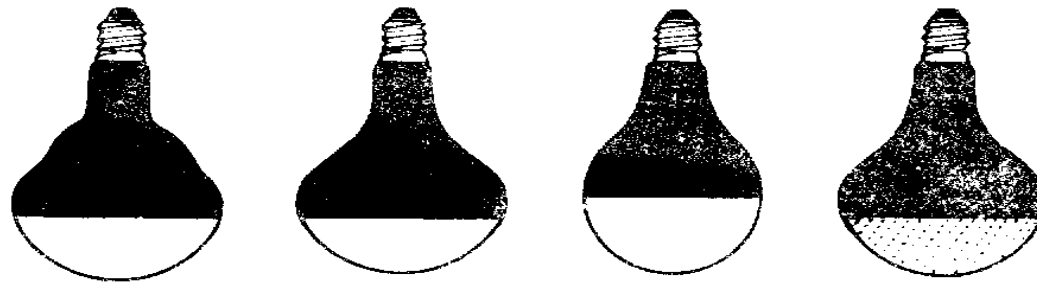
1. Promienniki podczerwieni o *otwartych żarnikach metalowych skrętkowych*:
  - skrętka z drutu umieszczona na rurze ceramicznej lub w otwartym kanale emituje promieniowanie ukierunkowane przez odbłyśnik,
  - moce do 2 kW,
  - temperatura żarnika – 900 °C,
  - ogrzewnictwo, rzadziej suszenie.
2. Promienniki podczerwieni o *nieosłoniętych żarnikach niemetalowych i metalowych prętowych, rurowych lub płytowych*:
  - żarniki z materiałów przeznaczonych do pracy w temperaturach ponad 1400 °C,
  - głównie w piecach próżniowych.



# Podział promienników ze względów konstrukcyjnych (2)

## 3. Promienniki podczerwieni o żarnikach w osłonach szklanych:

- żarnik wykonany z wolframu lub stopu rezystancyjnego,
- wewnątrz osłony szklanej jest próżnia, gaz obojętny, powietrze lub specjalna atmosfera,
- może być odbłyśnik wewnętrzny lub zewnętrzny,
- powszechnie stosowane promienniki lampowe o mocach do 500 W i trwałości 2000 – 5000 h,
- odrębna grupa – promienniki rurowe z osłonami szklanymi.



Rys. 3.8. Kształty współczesnych promienników lampowych z odbłyśnikami wewnętrznymi

# Podział promienników ze względów konstrukcyjnych (3)

4. Promienniki podczerwieni o *ceramicznych oraz metalowych płaszcach promieniujących*:
  - żarniki zaprasowane w ceramice.
5. *Łukowe lampy wyładowcze* – głównie ksenonowe lampy łukowe:
  - wykorzystują promieniowanie gazów i par metali.
6. *Promienniki nadfioletu* – wysokociśnieniowe lampy rtęciowe i lampy ksenonowe.

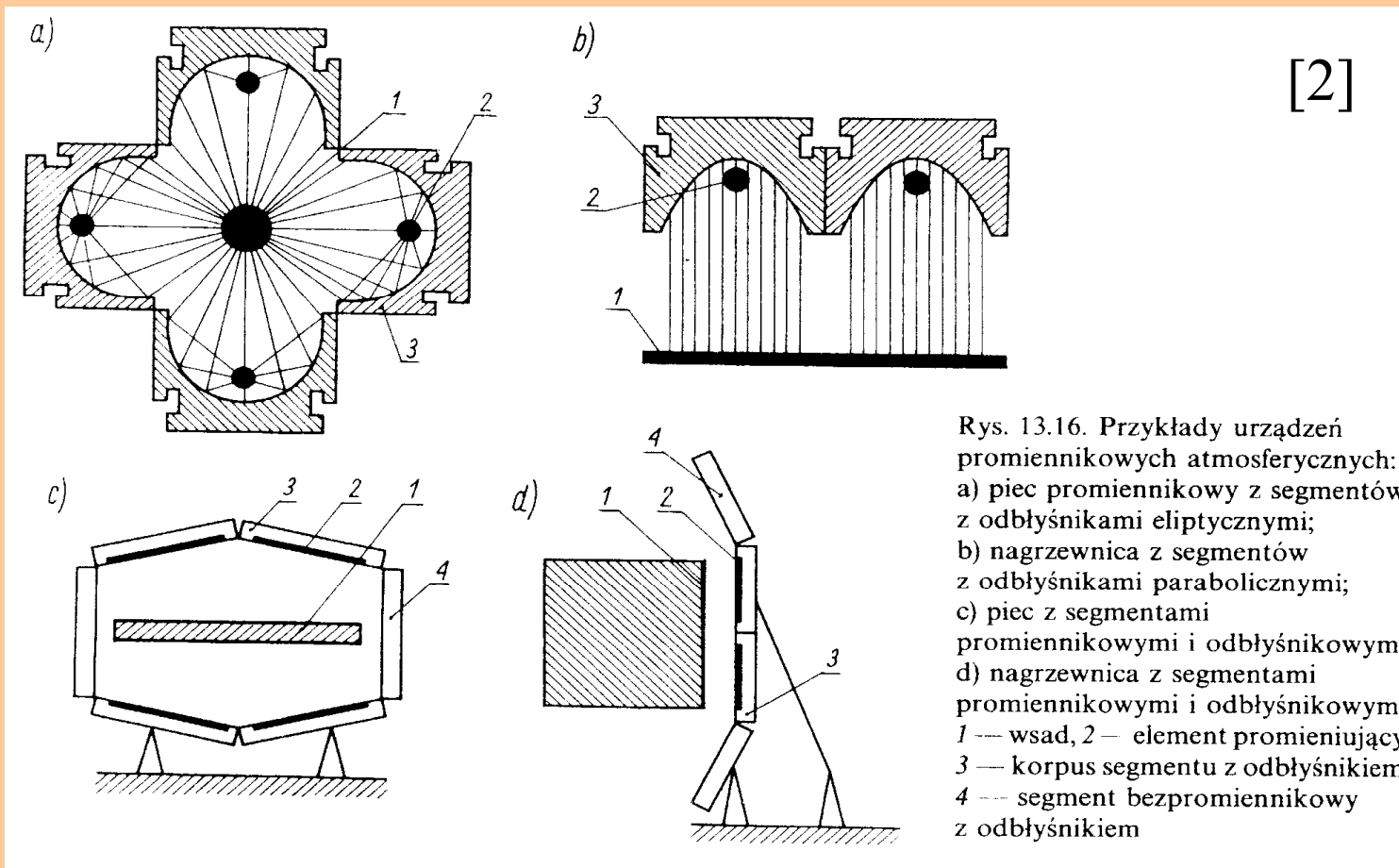
# **Techniczne źródła promieniowania - promienniki elektryczne**

Urządzenia promiennikowe można podzielić na:

- atmosferyczne (atmosferyczne),
- próżniowe.

# Urządzenia promiennikowe atmosferyczne

Tu należą **nagrzewnice**, **suszarki** i **piece** wyposażone w promienniki jako źródła ciepła.

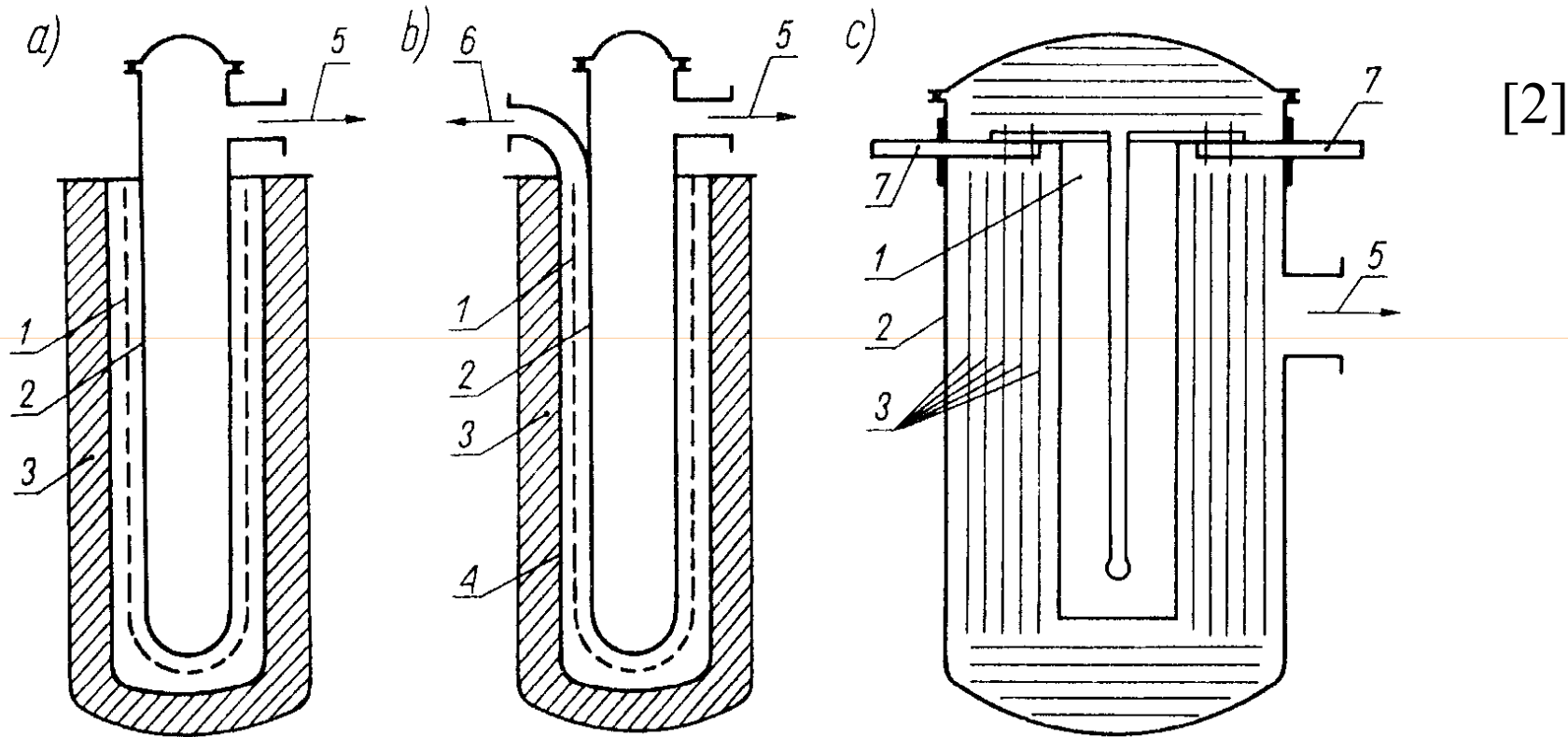


# Urządzenia promiennikowe atmosferyczne (2)

Zastosowania:

- a) Nagrzewanie metali (procesy obróbki cieplnej i plastycznej),
- b) Obróbka cieplna niemetali – głównie tworzyw sztucznych (zwiększenie ich plastyczności, utwardzenie żywic, wulkanizacja),
- c) Suszenie (podczerwień i nadfiolet):
  - powłok (lakiery, farby, emalie, kleje), szczególnie przemysł samochodowy: produkcja i naprawy, także drukarnie,
  - płatów (tkaniny, papier, skóry),
  - drobnic (materiały sproszkowane, ziarno)
- d) Ogrzewanie pomieszczeń oraz przestrzeni otwartych (trybuny stadionów, place budowy, stoiska uliczne). Ogrzewanie promiennikowe jest szczególnie przydatne do ogrzewania pomieszczeń zamkniętych stosowanych **doraźnie** (np. kościoły) oraz obszarów otwartych.
- e) Rozmrażanie ładunków masowych przymarzniętych do metalowych skrzyń rozładowywanych wagonów.

# Piece promiennikowe próżniowe



Rys. 13.17. Schematy promiennikowych pieców próżniowych: a) z gorącą komorą próżniową i źródłem ciepła w obszarze o ciśnieniu atmosferycznym; b) z gorącą komorą próżniową i źródłem ciepła w obszarze o obniżonym ciśnieniu; c) z zimną komorą próżniową i źródłem ciepła w obszarze o ciśnieniu roboczym  
1 — źródło ciepła, 2 — komora próżniowa, 3 — izolacja cieplna, 4 — zbiornik próżniowy, 5 — do układu pompowego, 6 — do układu pompowego (próżnia pośrednia), 7 — doprowadzenia prądowe

# Piece promiennikowe próżniowe

(2)

Zastosowania:

- a) Obróbki cieplna metali (hartowanie, starzenie, wyżarzanie) – najszerszy zakres zastosowania promiennikowych urządzeń próżniowych.
- b) Odgazowywanie metali trudno topliwych, oczyszczanie próżniowe metali, lutowanie lutami twardymi.
- c) Suszenie próżniowe: znacznie niższe temperatury wrzenia czynników odparowywanych → większa szybkość parowania → skrócenie czasu suszenia;

*Przykłady:*

- suszenie zmielonej kawy przed pakowaniem próżniowym,
- suszenie plutonu w procesie formowania prętów paliwowych, temperatura do 1000 °C.

# Ogrzewanie promiennikowe

Grzejniki promiennikowe, których temperatura jest wyższa od otoczenia, emitują promieniowanie elektromagnetyczne, którego energia jest pochłaniana zamieniana w ciepło przez chłodniejsze ściany i meble, a także przez osoby znajdujące się w pomieszczeniu. Im wyższa jest temperatura grzejnika, tym więcej ciepła on emituje.

Promienniki ogrzewają głównie znajdujących się w zasięgu ich działania ludzi i przedmioty, a nie otaczające ich powietrze. Efektem jest poprawa komfortu cieplnego - temperatura odczuwana jest o ok. 2-3 stopnie wyższa niż temperatura rzeczywista.

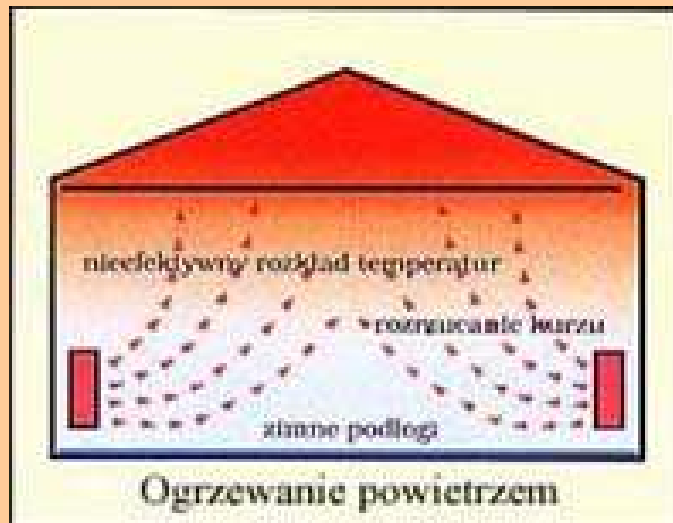
Metoda promiennikowa doskonale nadaje się do ogrzewania pomieszczeń o dużej kubaturze, np. kościołów oraz przestrzeni otwartych, np. stadionów.



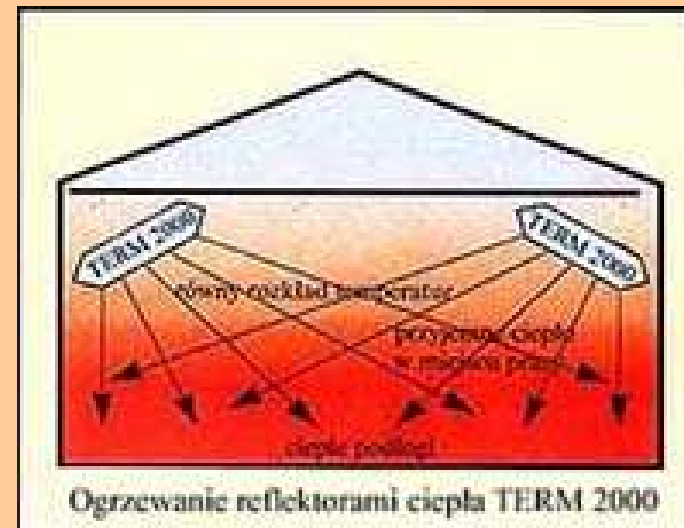
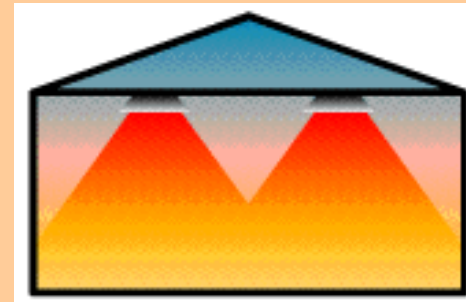
# Ogrzewanie promiennikowe

(2)

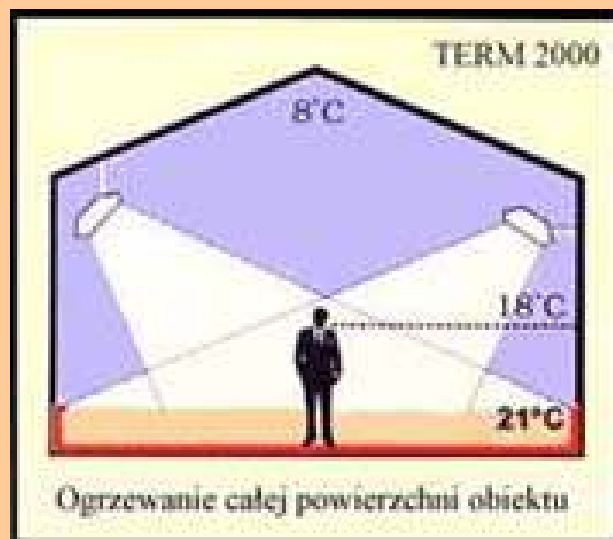
Ogrzewanie tradycyjne  
(konwekcyjne)



Ogrzewanie promiennikowe



# Ogrzewanie promiennikowe (2)



H1

# Grzejniki promiennikowe



## Slajd 67

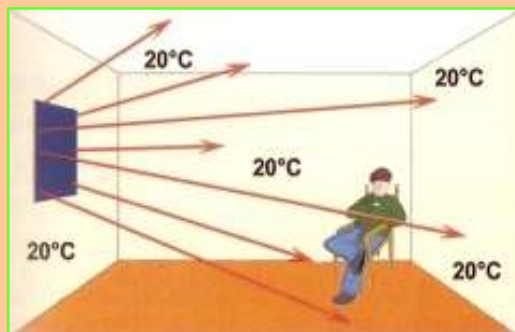
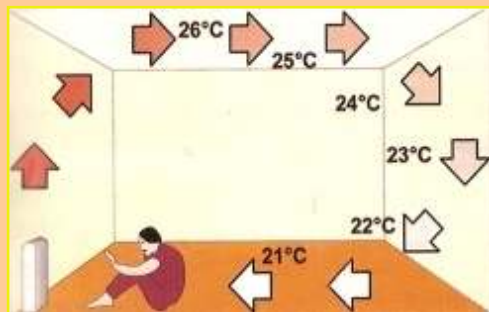
---

**H1**

Jeśli ogrzewana powierzchnia stanowi mniej niż 10% całkowitej powierzchni pomieszczenia

Hatka; 18-05-2009

# Panele (obrazy) grzewcze



# Przykłady ogrzewania promiennikami





# **Nagrzewanie promiennikowe - perspektywy**

Techniki nagrzewania promiennikowego należą do rozwojowych.

Dzięki wprowadzaniu nowego rodzaju promienników stają się konkurencyjne dla:

- metod paliwowych,
- a także dla innych metod elektrotermicznych.

# Literatura podstawowa

- [1] Hering M.: *Podstawy elektrotermii*, WNT, Warszawa cz.I. 1992.
- [2] Praca zbiorowa: *Poradnik Inżyniera Elektryka, tom 1. Rozdział Elektrotermia*, WNT, Warszawa 1996



**Dziękuję za uwagę**