



Wydział
Elektryczny

Organizatorzy:

Stowarzyszenie Elektryków Polskich

Oddział Szczeciński SEP

Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**„EUROELEKTRA”
Ogólnopolska Olimpiada Wiedzy Elektrycznej i Energetycznej
Rok szkolny 2025/2026**

**Zadania dla grupy energetycznej na zawody II stopnia
z rozwiązaniami**

Zadanie 1.

W turbinie kondensacyjnej elektrowni parowej rozprężana jest para przegrana o parametrach początkowych (na dopływie do turbiny) wynoszących $p_1 = 15 \text{ MPa}$ i $t_1 = 550 \text{ °C}$. Dla tych parametrów entalpia właściwa pary wynosi $h_1 = 3450,0 \text{ kJ/kg}$, a entropia właściwa $s_1 = 6,5230 \text{ kJ/(kg K)}$. Para opuszczająca turbinę jest parą nasyconą moką o temperaturze $t_2 = 40 \text{ °C}$. Strumień masowy pary przepływającej przez turbinę wynosi $\dot{m}_p = 650 \text{ t/h}$. Zakładając, że sprawność wewnętrzna turbiny wynosi $\eta_{it} = 78\%$, a sprawność mechaniczna turbiny $\eta_{mt} = 98\%$, oblicz moc mechaniczną $N_{mt} [\text{MW}]$ dostępną na wale turbiny. Oblicz również stopień suchości pary x_2 opuszczającej turbinę.

Parametry wody w stanie nasycenia dla 40°C wynoszą odpowiednio:

- dla cieczy nasyconej ($x=0$): entalpia właściwa $h' = 167,5 \text{ kJ/kg}$, entropia właściwa $s' = 0,5724 \text{ kJ/(kg K)}$,
- dla pary nasyconej ($x=1$): entalpia właściwa $h'' = 2573,5 \text{ kJ/kg}$, entropia właściwa $s'' = 8,2555 \text{ kJ/(kg K)}$.

Rozwiązanie:

Moc mechaniczna dostępna na wale turbiny:

$$N_{mt} = \eta_{mt} N_{it} \quad (1)$$

gdzie: N_{it} – moc wewnętrzna turbiny,

Moc wewnętrzną turbiny można obliczyć jako iloczyn strumienia masowego pary rozprężanej w turbinie i rzeczywistego spadku entalpii właściwej wg wzoru:

$$N_{it} = \dot{m}_p \cdot (h_1 - h_2) \quad (2)$$

gdzie: h_1 – entalpia właściwa pary na dopływie do turbiny, kJ/kg

h_2 – entalpia właściwa pary na wypływie z turbiny, kJ/kg

Entalpię właściwą pary h_2 na wypływie z turbiny można wyznaczyć z zależności na sprawność wewnętrzną turbiny. Sprawność ta definiowana jest jako stosunek rzeczywistej pracy w turbinie do pracy maksymalnej, którą można osiągnąć przy założeniu izentropowego spadku entalpii w turbinie ($s_1 = s_{2s}$):

$$\eta_{it} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3)$$

gdzie: h_{2s} – entalpia właściwa pary na końcu rozprężania przy założeniu procesu izentropowego (brak strat wewnętrznych),

Z przekształconej zależności (3) można wyznaczyć wartość entalpii właściwej h_2 :

$$h_2 = h_1 - \eta_{it}(h_1 - h_{2s}) \quad (3a)$$

Przed wyznaczeniem entalpii właściwej h_2 należy w pierwszej kolejności wyznaczyć wartość entalpii właściwej h_{2s} .

W tym celu należy na podstawie wartości entropii właściwej s_{2s} oraz wartości entropii właściwych na liniach nasycenia $x=0$ i $x=1$ (s' , s''), wyznaczyć stopień suchości pary na końcu teoretycznego izentropowego procesu rozprężania w turbinie x_{2s} .

Stopień suchości x_{2s} należy wyznaczyć z równania na wartość entropii właściwej dla pary nasyconej mokrej:

$$s_{2s} = s' + x_{2s} \cdot (s'' - s') \quad (4)$$

Po przekształceniu równania (4) otrzymujemy:

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s'}{s'' - s'} \quad (4a)$$

Ponieważ rozpatrujemy proces izentropowy zatem:

$$s_{2s} = s_1 = 6,5230 \text{ kJ/kg}$$

Podstawiając dane liczbowe do zależności (4a) otrzymujemy x_{2s} :

$$x_{2s} = \frac{s_{2s} - s'}{s'' - s'} = \frac{6,5230 - 0,5724}{8,2555 - 0,5724} = 0,7745$$

Entalpię właściwą h_{2s} wyznaczamy z równania na wartość entalpii właściwej dla pary nasyconej mokrej o stopni suchości x_{2s} :

$$h_{2s} = h' + x_{2s} \cdot (h'' - h') \quad (5)$$

Podstawiając dane liczbowe do zależności (5) otrzymujemy:

$$h_{2s} = 167,5 + 0,7745 \cdot (2573,5 - 167,5) = 2030,9 \text{ kJ/kg}$$

Teraz wracamy do zależności (3a) i wyznaczamy wartość liczbową entalpii właściwej pary opuszczającej turbinę h_2 :

$$h_2 = h_1 - \eta_{it}(h_1 - h_{2s}) = 3450,0 - 0,78 \cdot (3450,0 - 2030,9) = 2343,1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2343,1 \text{ kJ/kg}$$

Wykorzystując zależność (2) wyznaczamy moc wewnętrzną turbiny N_{it} :

$$N_{it} = \dot{m}_p \cdot (h_1 - h_2) = 650 \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right) \cdot (3450,0 - 2343,1) = 199857 \text{ kW}$$

$$N_{it} = 199857 \text{ kW} = 199,86 \text{ MW}$$

Następnie wyznaczamy moc mechaniczną N_{mt} dostępną na wale turbiny z zależności (1):

$$N_{mt} = \eta_{mt} N_{it} = 0,98 \cdot 199,86 = 195,86 \text{ MW}$$

$$\mathbf{N_{mt} = 195,86 \text{ MW}}$$

Stopień suchości pary na wypływie z turbiny x_2 wyznaczamy korzystając z zależności na entalpię właściwą pary nasyconej mokrej h_2 :

$$h_2 = h' + x_2 \cdot (h'' - h') \quad (6)$$

Przekształcając zależność (6) i podstawiając dane liczbowe otrzymujemy:

$$x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = \frac{2343,1 - 167,5}{2573,5 - 167,5} = 0,9042$$

$$\mathbf{x_2 = 0,90}$$

Odp. Moc mechaniczna dostępna na wale turbiny wynosi $N_{mt} = 195,86 \text{ MW}$, a stopień suchości pary na wypływie z turbiny wynosi $x_2 = 0,90$.

Zadanie 2.

Zakład przemysłowy pobiera w okresie miesięcznym (720 h) energię **czynną** 130 MWh oraz **czynną bierną** 120 MVarh. Oblicz moc baterii kondensatorów, aby współczynnik mocy zakładu podnieść do $\cos\varphi = 0,92$.

Rozwiązanie:

średnie wartości mocy czynnej i biernej:

$$P_{\text{sr}} = \frac{130}{720} = 0,18 \text{ MW}$$

$$Q_{\text{sr}} = \frac{120}{720} = 0,167 \text{ MVar}$$

średni współczynnik mocy:

$$\cos\varphi_{\text{sr}} = \frac{P_{\text{sr}}}{\sqrt{P_{\text{sr}}^2 + Q_{\text{sr}}^2}} = \frac{0,18}{\sqrt{0,18^2 + 0,167^2}} = 0,732$$

odpowiada: $\tan\varphi_{\text{sr}} = 0,931$

po zainstalowaniu baterii kondensatorów współczynnik mocy ma wynieść 0,92 czyli:

$$\cos\varphi_2 = 0,92$$

co odpowiada: $\tan\varphi_2 = 0,427$

Moc baterii kondensatorów obliczamy z wzoru:

$$Q_c = P_{\text{sr}} \cdot (\tan\varphi_{\text{sr}} - \tan\varphi_2) = 180 \cdot (0,931 - 0,427) = 90 \text{ kVar}$$

Odpowiedź

$$Q_c = 90 \text{ kVar}$$

Zadanie 3.

Wyznacz czas potrzebny do zagotowania w czajniku na kuchence gazowej 1 litra wody o temperaturze początkowej $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Strumień objętościowy gazu spalanego w palniku kuchenki wynosi 3,43 l/min (wartość opałowa gazu 35 MJ/m³). W obliczeniach przyjmij, że 30% ciepła wydzielanego w trakcie spalania gazu tracone jest bezpowrotnie do otoczenia, a ciepło właściwe wody nie zależy od temperatury i wynosi $c_w = 4,18 \text{ kJ/(kg K)}$. Pozostałe założenia: gęstość wody: $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, ciśnienie panujące w pomieszczeniu, w którym zainstalowana jest kuchenka wynosi $p = 1013 \text{ hPa}$.

Rozwiązanie:

Przy ciśnieniu otoczenia $p=1013 \text{ hPa}$ (ciśnienie normalne) temperatura wrzenia wody wynosi 100°C .

Zatem temperatura końcowa wody wynosi:

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

Ilość energii potrzebnej do podgrzania 1 litra wody od temperatury początkowej $t_1=15^\circ\text{C}$ do temperatury $t_2=100^\circ\text{C}$ (czyli temperatury wrzenia), można obliczyć ze wzoru:

$$Q_w = m_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Masę wody m_w obliczamy z przekształconej zależności definicyjnej na gęstość:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \rightarrow m_w = \rho_w \cdot V_w \quad (2)$$

gdzie: V_w – objętość wody, m³
 ρ_w – gęstość wody, kg/m³

Podstawiając zależność (2) do zależności (1) otrzymujemy:

$$Q_w = \rho_w \cdot V_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$Q_w = \rho_w \cdot V_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1) = 1000 \cdot \frac{1}{1000} \cdot 4,18 \cdot (100 - 15) = 355,30 \text{ kJ}$$
$$Q_w = 355,30 \text{ kJ}$$

Biorąc pod uwagę strumień objętościowy spalanego gazu $\dot{V}_g=3,43 \text{ l/min}$ oraz jego wartość opałową $W_d=35 \text{ MJ/m}^3$ można wyznaczyć moc cieplną palnika \dot{Q}_g :

$$\dot{Q}_g = \dot{V}_g \cdot W_d \quad (4)$$

Strumień spalanego gazu należy wstawić w jednostkach m³/s, zatem trzeba przy przeliczaniu strumienia objętości z l/min zastosować przelicznik $\frac{10^{-3}}{60}$. Uwzględniając to moc cieplna palnika wynosi:

$$\dot{Q}_g = \dot{V}_g \cdot W_d = 3,43 \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{60} \cdot 35000 = 2,0 \text{ kW}$$
$$\dot{Q}_g = 2,00 \text{ kW}$$

Uwzględniając, że 30% ciepła wydzielanego w trakcie spalania gazu w palniku kuchenki to straty do otoczenie można wyznaczyć strumień ciepła użytecznego \dot{Q}_u , które pochłaniane jest przez wodę w czajniku. Strumień tego ciepła stanowi 70% mocy palnika \dot{Q}_g . Zatem:

$$\dot{Q}_u = 0,7 \cdot \dot{Q}_g \quad (5)$$

$$\dot{Q}_u = 0,7 \cdot \dot{Q}_g = 0,7 \cdot 2,00 = 1,4 \text{ kW}$$

W celu określenia czasu potrzebnego do zagotowania wody należy podzielić ilość ciepła jaką trzeba dostarczyć do wody przez strumień ciepła użytecznego \dot{Q}_u (czyli rzeczywistą moc cieplną przekazywaną ze źródła ciepła). Zatem:

$$\tau = \frac{Q_w}{\dot{Q}_u} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{Q_w}{\dot{Q}_u} = \frac{355,3 \text{ kJ}}{1,4 \text{ kW}} = 253,8 \text{ s} \approx 254 \text{ s}$$

$$\tau \approx 4 \text{ min } 14 \text{ s}$$

Odp. Wymagany czas do podgrzania wody to 254 s (czyli 4 min i 14 s).

Zadanie 4.

Płaski kolektor słoneczny o powierzchni użytkowej $P = 1,80 \text{ m}^2$ zbudowany jest z rurek o średnicy wewnętrznej wynoszącej $d = 7,5 \text{ mm}$, w którym przepływa woda z prędkością $w = 0,9 \text{ m/s}$. Proszę określić w jakim przedziale sprawności pracował kolektor $\Delta\eta$, jeżeli przyrost temperatury wody w kolektorze ΔT zmieniał się od 10,1 do 12,5 K. Do obliczeń należy przyjąć, że parametry wody wynoszą: gęstość $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, średnie ciepło właściwe $c_p = 4,19 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, a natężenie promieniowania słonecznego $E = 1200 \text{ W/m}^2$.

Rozwiązanie:

Sprawność kolektora możemy obliczyć z zależności:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{E \cdot P} 100\%,$$

gdzie \dot{Q} strumień ciepła pozyskany w kolektorze, który określimy następująco:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot \Delta T = \frac{\pi d^2}{4} \cdot w \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Zatem:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{E \cdot P} 100\% = \frac{\dot{m}_w \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot \Delta T}{E \cdot P} 100\% = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot w \cdot \rho_w \cdot \Delta T}{E \cdot P} 100\%$$

Obliczenie sprawności dla dwóch przyrostów temperatury wody w kolektorze:

$$\eta_{\Delta T} = \eta_{10,1} = \frac{\frac{\pi (7,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 0,9 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \cdot 10,1}{1200 \cdot 1,8} 100\% = 77,90\%$$

$$\eta_{\Delta T} = \eta_{12,5} = \frac{\frac{\pi (7,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 0,9 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \cdot 12,5}{1200 \cdot 1,8} 100\% = 96,41\%$$

Stąd $\Delta\eta = 77,90 - 96,41\%$

Zadanie 5.

Napowietrzna linia trójfazowa o napięciu znamionowym 30 kV zasila zakład przemysłowy o mocy szczytowej $S = 1,5$ MVA przy $\cos\varphi = 0,8$. Oblicz moc i pojemność baterii kondensatorów włączonych szeregowo do linii w celu zmniejszenia spadku napięcia w linii o 4% napięcia znamionowego.

Rozwiązanie:

zapotrzebowana zwyżka napięcia:

$$\Delta U_c = \frac{4 \cdot 30}{100 \cdot \sqrt{3}} = 0,694 \text{ kV}$$

$$\Delta U_c = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot X_c$$

stąd:

$$X_c = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot \Delta U_c}{Q}$$

Pojemność baterii kondensatorów:

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{Q}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \Delta U_c}$$

$$C = \frac{S \cdot \sin\varphi}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \Delta U_c} = \frac{1,5 \cdot 0,6}{314 \cdot \sqrt{3} \cdot 30 \cdot 0,694} = 80 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 80 \text{ } \mu\text{F}$$

Moc baterii:

$$Q_c = 3 \cdot I^2 \cdot X_c = 3 \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \right)^2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot \Delta U_c}{Q} = \frac{S^2 \cdot \sqrt{3} \cdot \Delta U_c}{U \cdot Q} = \frac{1,5^2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,694}{30 \cdot 1,5 \cdot 0,6} = 0,10 \text{ MVar}$$

Odpowiedź:

$$C = 80 \text{ } \mu\text{F}, Q_c = 0,10 \text{ MVar}$$