



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 III stopnia

Instrukcja dla zdającego

1. Czas trwania zawodów: 120 minut.
2. III stopień Olimpiady zawiera 5 zadań otwartych.
3. Należy podać poprawną odpowiedź wraz z tokiem rozwiązania.
4. Za każdą prawidłową odpowiedź uzyskuje się maksymalnie 10 punktów. Maksymalna liczba punktów do zdobycia za 5 zadań to 50 punktów.
5. Można korzystać z przyborów do pisania, rozdawanych kart czystopisu i brudnopisu, kalkulatorów i tablic matematycznych. Korzystanie z notebooków, tabletów, telefonów komórkowych, smartfonów, smartwatchy, kalkulatorów programowalnych, itp. jest zabronione.

Życzymy powodzenia!

Zadanie 1.

Określ wielkość rocznych (przyjąć 365 dni – 1 rok) jałowych strat energii w trójfazowej linii elektroenergetycznej kablowej prądu przemiennego o napięciu znamionowym 10 kV (napięcie znamionowe sieci to napięcie międzyfazowe). Do obliczeń przyjąć: współczynnik strat dielektrycznych izolacji kabli $\text{tg}\delta = 0,003$, pojemność jednostkową linii kablowych $C' = 0,39 \mu\text{F/km}$, częstotliwość napięcia sieci $f = 50 \text{ Hz}$, długość linii kablowej $l = 7 \text{ km}$.

Rozwiązanie:

Czas pracy linii za cały rok:

$$T_R = 365 \cdot 24 \text{ h} = 8760 \text{ h}$$

Pojemność linii:

$$C = C' \cdot l = 0,39 \cdot 7 = 2,73 \mu\text{F}$$

Susceptancja linii:

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,73 \cdot 10^{-6} = 8,58 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

Konduktancja poprzeczna:

$$G = tg\delta \cdot B = 0,003 \cdot 8,58 \cdot 10^{-4} = 2,573 \mu S$$

Moc tracona na konduktancji poprzecznej linii:

$$\Delta P = U^2 \cdot G = (10 \cdot 10^3)^2 \cdot 2,573 \cdot 10^{-6} = 257,3 W$$

Roczne straty:

$$\Delta E = \Delta P \cdot T_R = 257,3 \cdot 8760 = 2,254 MWh$$

Roczne straty w izolacji linii wynoszą 2,254 MWh.

Zadanie 2.

W kotle spalane jest paliwo stałe (węgiel) w ilości 100 kg na godzinę. Analiza składu węgla wykazała, że w stanie roboczym 75% masy paliwa stanowi pierwiastek C, 0,5% pierwiastek S (siarka), wodór stanowi 3% składu masowego, tlen 5%, a azot 1,5%. Dodatkowo stwierdzono, że niepalna część paliwa (popiół) stanowi 5%, a pozostała część to wilgoć.

Do wyznaczenia wartości opałowej paliwa stałego na podstawie jego składu można zastosować poniższy wzór Dulonga:

$$W_u = 34000 \cdot c + 121500 \left[h - \frac{o}{8} \right] + 10500 \cdot s - 2510 \left[w + \frac{9}{8} o \right] \frac{kJ}{kg}$$

Poszczególne symbole w powyższej zależności oznaczają masowe udziały poszczególnych składników paliwa.

Wykorzystując przedstawione informacje wyznacz możliwy do podgrzania masowy strumień wody, przy założeniu, że kocioł współpracuje z instalacją grzewczą na parametry 90/50 (temperatura zasilania/temperatura powrotu). W obliczeniach przyjmij, że sprawność kotła wynosi 92%, a ciepło właściwe wody nie zależy od temperatury i wynosi 4,18 kJ/(kg K).

Rozwiązanie:

Wyznaczamy udziały masowe poszczególnych składników paliwa. W treści zadania mamy podane udziały masowe w [%], przedstawiamy to bezwymiarowo, jako:

Udział masowy węgla: $c = 0,75$;

Udział masowy wodoru: $h = 0,03$;

Udział masowy siarki: $s = 0,005$;

Udział masowy tlenu: $o = 0,05$;

Udział masowy azotu: $n = 0,015$,

Udział masowy popiołu: $a = 0,05$.

Udział masowy wilgoci w :

skoro suma udziałów masowych wszystkich składników paliwa jest równa 1, zatem:

$$w = 1 - c - h - s - o - n - a \quad (1)$$

Podstawiając dane otrzymujemy:

$$w = 1 - 0,75 - 0,03 - 0,005 - 0,05 - 0,015 - 0,05$$

$$w = 0,10$$

Wykorzystując podany wzór Dulonga wyznaczamy wartość opałową paliwa:

$$W_u = 34000 \cdot c + 121500 \left[h - \frac{o}{8} \right] + 10500 \cdot s - 2510 \left[w + \frac{9}{8} o \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (2)$$

Podstawiając dane liczbowe otrzymujemy:

$$W_u = 34000 \cdot 0,75 + 121500 \left[0,03 - \frac{o}{8} \right] + 10500 \cdot 0,005 - 2510 \left[0,1 + \frac{9}{8} \cdot 0,05 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_u = 28045,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Wyznaczamy strumień masowy paliwa spalane w kotle. Wiemy, że w ciągu 1 godziny spalane jest 100 kg paliwa. Zatem strumień masowy wyznaczamy jako iloraz masy spalane paliwa do czasu:

$$\dot{m}_{pal} = \frac{m_{pal}}{\tau} \quad (3)$$

gdzie:

m_{pal} – masa paliwa, [kg],

τ – czas, [s].

Ponieważ 1 godzina to 3600 sekund, zatem strumień masowy paliwa wynosi:

$$\dot{m}_{pal} = \frac{100}{3600} = 0,028 \text{ kg/s}$$

Sprawność kotła określana jest jako stosunek użytecznego strumienia energii \dot{Q}_u przekazanego w kotle do czynnika grzewczego do strumienia energii doprowadzonej do kotła \dot{E}_d . Można to przedstawić w postaci następującej zależności:

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{E}_d} \quad (4)$$

Użyteczny strumień energii \dot{Q}_u przekazany w kotle do czynnika grzewczego wynika ze strumienia masowego wody przepływającej przez kocioł i przyrostu temperatury tej wody. Strumień ciepła użytecznego można wyznaczyć z następującej zależności:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1) \quad (5)$$

gdzie:

\dot{m}_w – strumień masowy wody przepływającej przez kocioł, [kg/s],

t_1 – temperatura wody dopływającej do kotła ($t_1 = 50^\circ\text{C}$ wynika z parametrów instalacji grzewczej),

t_2 – temperatura wody wypływającej z kotła ($t_2 = 90^\circ\text{C}$ wynika z parametrów instalacji grzewczej).

Strumienia energii doprowadzonej do kotła \dot{E}_d wynika ze strumienia masowego paliwa i wartości opałowej tego paliwa. Zależność przedstawia się następująco:

$$\dot{E}_d = \dot{m}_{pal} \cdot W_d \quad (6)$$

Uwzględniając zależności (5) i (6), wzór na sprawność kotła przyjmuje postać:

$$\eta_k = \frac{\dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_2 - t_1)}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \quad (7)$$

Możliwy do podgrzania strumień masowy wody (przy założonych warunkach) można określić z przekształconej zależności (7):

$$\dot{m}_w = \frac{\eta_k \cdot \dot{m}_{pal} \cdot W_d}{c_w \cdot (t_2 - t_1)} \quad (8)$$

Podstawiając dane liczbowe otrzymujemy:

$$\dot{m}_w = \frac{0,92 \cdot 0,028 \cdot 28045,9}{4,18 \cdot (90 - 50)} \approx 4,3 \text{ kg/s}$$

Odpowiedź: Możliwy do podgrzania masowy strumień wody wynosi 4,3 kg/s.

Zadanie 3.

Dokonaj analizy następujących konfiguracji wyłączników

- A. W1 – zamknięty, W2 – zamknięty
- B. W1 – otwarty, W2 – zamknięty,
- C. W1 – zamknięty, W2 – otwarty
- D. W1 – otwarty, W2 – otwarty,

Przy jakiej kombinacji wyłączników kiedy wystąpi największy prąd zwarcia w przypadku zwarcia symetrycznego trójfazowego. Przyjąć założenie, że rezystancje są wielokrotnie mniejsze niż reaktancje, więc w obliczeniach można ją pominąć.

Dane:

$$X_{SEE1} = 0,32 \, \Omega,$$

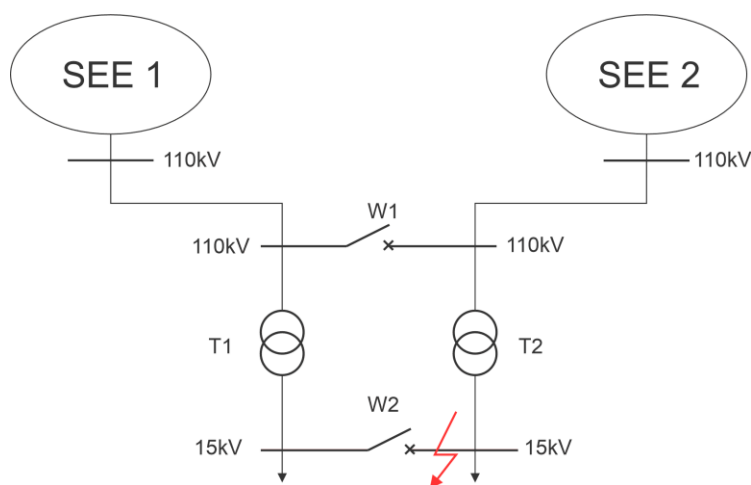
$$X_{SEE2} = 0,35,$$

$$X_{L1} = 0,15 \, \Omega,$$

$$X_{L2} = 0,18,$$

$$X_{T1} = X_{T2} = 2,1 \, \Omega.$$

Powyższe reaktancje są przeliczone na napięcie 15 kV.



Rozwiązanie:

Wykorzystujemy twierdzenie Thevenina

Przypadek A – W1 zamknięte, W2 zamknięte

Reaktancja zastępcza obwodu:

$$X_{kA} = \frac{(X_{SEE1} + X_{L1}) \cdot (X_{SEE2} + X_{L2})}{X_{SEE1} + X_{L1} + X_{SEE2} + X_{L2}} + \frac{X_{T1}}{2} = \frac{(0,32 + 0,15) \cdot (0,35 + 0,18)}{0,32 + 0,15 + 0,35 + 0,18} + \frac{2,1}{2} = 1,2991 \, \Omega$$

$$I_{kA}'' = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{kA}} = \frac{1,1 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 1,2991} = 7,332983944 \, \text{kA}$$

Przypadek B – W1 – otwarty, W2 – zamknięty

Reaktancja zastępcza obwodu:

$$X_{kB} = \frac{(X_{SEE1} + X_{L1} + X_{T1}) \cdot (X_{SEE2} + X_{L2} + X_{T2})}{X_{SEE1} + X_{L1} + X_{T1} + X_{SEE2} + X_{L2} + X_{T2}} = \frac{(0,32 + 0,15 + 2,1) \cdot (0,35 + 0,18 + 2,1)}{0,32 + 0,15 + 2,1 + 0,35 + 0,18 + 2,1} = 1,2998 \, \Omega$$

$$I_{kB}'' = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{kB}} = \frac{1,1 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 1,2998} = 7.329034807 \text{ kA}$$

Przypadek C - W1 – zamknięty, W2 – otwarty

Reaktancja zastępcza obwodu:

$$X_{kC} = \frac{(X_{SEE1} + X_{L1}) \cdot (X_{SEE2} + X_{L2})}{X_{SEE1} + X_{L1} + X_{SEE2} + X_{L2}} + X_{T1} = \frac{(0,32 + 0,15) \cdot (0,35 + 0,18)}{0,32 + 0,15 + 0,35 + 0,18} + 2,1 = 2.3491 \Omega$$

$$I_{kC}'' = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{kC}} = \frac{1,1 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 2.3491} = 4.055289022 \text{ kA}$$

Przypadek D - W1 – otwarty, W2 – otwarty

Reaktancja zastępcza obwodu:

$$X_{kD} = X_{SEE2} + X_{L2} + X_{T2} = 0,35 + 0,18 + 2,1 = 2,63 \Omega$$

$$I_{kD}'' = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_{kD}} = \frac{1,1 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 2,63} = 3.622159484 \text{ kA}$$

Największy prąd zwarciovyy wystąpi w przypadku A i B kiedy linie i transformatory będą pracowały równolegle.

Zadanie 4.

Określić ilość energii elektrycznej (w MWh) zużywanej w elektrowni szczytowo-pompowej (przy całkowitym napełnianiu górnego zbiornika) E_{pomp} , ilość energii elektrycznej (w MWh) przekazanej do sieci (całkowite opróżnianie zbiornika górnego) $E_{turbgener}$ oraz całkowitą sprawność cyklu magazynowania energii η_{cykl} (stosunek energii odzyskanej do włożonej) przy następujących założeniach: objętość zbiornika górnego $V_g = 10^6 \text{ m}^3$, sprawność układu silnik-pompa $\eta_{sil_pomp} = 80\%$, sprawność turbiny $\eta_{turb} = 94\%$, sprawność generatora $\eta_{gener} = 94\%$, a średnia wysokość pomiędzy dolnym i górnym zbiornikiem wynosi $h = 200 \text{ m}$. Przyjąć wartość przyspieszenia ziemskiego $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$, gęstość wody $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Rozwiązanie:

Energię potencjalną związaną z opróżnianiem zbiornika górnego możemy obliczyć z zależności:

$$E_p = m_g \cdot g \cdot h,$$

gdzie m_g to masa wody zgromadzona w zbiorniku górnym ($m_g = V_g \cdot \rho_w$).

$$\text{Zatem } E_p = m_g \cdot g \cdot h = V_g \cdot \rho_w \cdot g \cdot h = 10^6 \cdot 1000 \cdot 9,80665 \cdot 200 \cong 1,96 \cdot 10^{12} \text{ J} = 1,96 \text{ TJ}$$

Sprawność układu silnik-pompa definiujemy jako stosunek energii użytecznej do energii zużytej na pompowanie:

$$\eta_{sil_pomp} = \frac{E_p}{E_{pomp}},$$

stąd energia pobrana z sieci i wykorzystana na pompowanie wynosi:

$$E_{pomp} = \frac{E_p}{\eta_{sil_pomp}} = \frac{1,96}{0,8} = 2,45 \text{ TJ}$$

$$\text{wiedząc, że } 1 \text{ J} = \frac{1}{3600} \text{ Wh, zatem } 1 \text{ TJ} = \frac{1}{3600} 10^6 \text{ MWh} \cong 277,78 \text{ MWh}.$$

$$\text{Stąd } E_{pomp} = 2,45 \cdot 277,78 = 689,561 \text{ MWh}$$

Podczas spuszczenia wody ze zbiornika górnego do dolnego energia potencjalna wykorzystywana jest na generowanie energii elektrycznej (praca turbogeneratora), stąd:

$$E_{turbgener} = \eta_{turb} \cdot \eta_{gener} \cdot E_p = 0,94 \cdot 0,94 \cdot 1,96 = 1,73 \text{ TJ}$$

$$E_{turbgener} = 1,73 \cdot 277,78 = 480,559 \text{ MWh}$$

Całkowitą sprawność cyklu magazynowania energii (stosunek energii odzyskanej do włożonej) określimy z zależności:

$$\eta_{cykl} = \frac{E_{turbgener}}{E_{pomp}} = \frac{1,73}{2,45} = 0,7061 = 70,61\%$$

Do obliczenia całkowitej sprawności cyklu magazynowania energii możemy również wykorzystać sprawności obu etapów:

$$\eta_{cykl} = \eta_{etap I} \cdot \eta_{etap II} = \eta_{sil_pomp} \cdot (\eta_{turb} \cdot \eta_{gener}) = 0,8 \cdot (0,94 \cdot 0,94) = 0,7069 = 70,69\%$$

Uwaga: różnica w obliczeniach sprawności cyklu magazynowania energii wynika z zaokrąglenia wyników obliczeń.

Odpowiedź: Ilość energii elektrycznej zużywanej w elektrowni szczytowo-pompowej (przy całkowitym napełnianiu górnego zbiornika) E_{pomp} wynosi 689,561 MWh, przekazanej do sieci (całkowite opróżnianie zbiornika górnego) przez turbogenerator ($E_{turbogener}$) 480,559 MWh, a sprawność cyklu magazynowania energii $\eta_{cykl} = 70,61\%$

Zadanie 5.

W ciągu dnia kolektor słoneczny dostarcza do stalowego zasobnika c.w.u. (o masie $m_{zas} = 40$ kg) energię w ilości $Q_{KOL} = 30$ MJ. W zasobniku tym znajduje się $m_{woda} = 160$ kg wody o temperaturze początkowej $t_w = 18$ °C. Obliczyć temperaturę wody w zasobniku pod koniec dnia t_{KD} , temperaturę wody w zasobniku rano następnego dnia t_{RANO} oraz jaką ilość energii Q_{DOP} [MJ] należy dostarczyć do zasobnika w kolejnym dniu, aby osiągnąć wieczorem tego dnia temperaturę wody $t_{WIECZOR} = 75$ °C. Określ również, jaką powierzchnią kolektora słonecznego musielibyśmy dysponować, aby w ciągu 2 h uzyskać temperaturę t_{WIECZ} – obliczenie te wykonaj dla warunków STC i NOCT. Przyjąć, że nocne straty energii zasobnika c.w.u. wynoszą $\eta_{NOC} = 14\%$ (zasobnik w pomieszczeniu o temp. 18 °C), średnie ciepło właściwe wody $c_{p_woda} = 4,19$ kJ/(kgK), średnie ciepło właściwe stali $c_{p_stal} = 0,5$ kJ/(kgK), sprawność kolektora (uwzględniająca również wszelkie straty na drodze do zasobnika) $\eta_{KOL} = 55\%$.

Rozwiązanie:

Obliczamy pojemność cieplną całego układu (woda + zasobnik c.w.u.):

$$C_{UKŁAD} = C_W + C_{ZAS} = m_W \cdot c_{pW} + m_{ZAS} \cdot c_{pSTAL}$$

$$C_{UKŁAD} = 160 \cdot 4,19 + 40 \cdot 0,5 = 690,4 \text{ kJ/K}$$

Energia dostarczona do układu przez kolektor wynosi:

$$Q_{KOL} = C_{UKŁAD} \cdot \Delta T_{KD} = C_{UKŁAD} \cdot (t_{KD} - t_W),$$

$$\text{stad } t_{KD} = \frac{Q_{KOL}}{C_{UKŁAD}} + t_W = \frac{30 \cdot 10^3}{690,4} + 18 \cong 61,5^\circ\text{C}$$

Energia zasobnika o poranku drugiego dnia, uwzględniająca nocne straty:

UWAGA: skoro temperatura pomieszczenia wynosi 18°C (tak jak temp. początkowa wody zgromadzonej w zasobniku), zatem straty nocne dotyczą energii dostarczonej przez słońce (powyżej temperatury początkowej), a nie całej energii zgromadzonej w układzie.

$$Q_{RANO} = (1 - \eta_{NOC}) \cdot Q_{KOL},$$

stad temperatura wody w zasobniku rano wyniesie:

$$t_{RANO} = \frac{Q_{RANO}}{C_{UKŁAD}} + t_W = \frac{(1 - \eta_{NOC}) \cdot Q_{KOL}}{C_{UKŁAD}} + t_W = \frac{(1 - 0,14) \cdot 30 \cdot 10^3}{690,4} + 18 \cong 55,4^\circ\text{C}$$

Energię doprowadzoną do zasobnika Q_{DOP} w kolejnym dniu, skutkującą uzyskaniem temperatury wody w zasobniku o wartości $t_{WIECZ} = 75^\circ\text{C}$, obliczymy wykorzystując zależność:

$$Q_{DOP} = C_{UKŁAD} \cdot \Delta T_{KND} = C_{UKŁAD} \cdot (t_{WIECZ} - t_{RANO}) = 690,4 \cdot (75 - 55,4) \cdot 10^{-3} = 13,5 \text{ MJ}$$

Aby obliczyć niezbędną powierzchnię kolektorów słonecznych, które w czasie 2 h doprowadziłyby do układu energię Q_{DOP} należy wykorzystać zależność na energię dostarczoną przez kolektor:

$$Q_{KOL \ t_{WIECZ}} = Q_{DOP} = G \cdot A_{KOL} \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL},$$

gdzie: G – natężenie promieniowania w zadanych warunkach, A_{KOL} – powierzchnia kolektora,

$\tau_{t_{WIECZ}}$ – czas osiągnięcia w kolektorze (wieczorem) temperatury, czyli 75°C .

Z przekształcenia zależności otrzymujemy:

$$A_{KOL} = \frac{Q_{KOL} \cdot t_{WIECZ}}{G \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL}} = \frac{Q_{DOP}}{G \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL}}$$

Obliczenia należy przeprowadzić dla warunków STC i NOCT, stąd $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$, zaś $G_{NOCT}=800 \text{ W/m}^2$, zatem:

$$A_{KOL_STC} = \frac{Q_{DOP}}{G_{STC} \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL}} = \frac{13,5 \cdot 10^6}{1000 \cdot 2 \cdot 3600 \cdot 0,55} \cong 3,41 \text{ m}^2$$

$$A_{KOL_NOCT} = \frac{Q_{DOP}}{G_{NOCT} \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL}} = \frac{13,5 \cdot 10^6}{800 \cdot 2 \cdot 3600 \cdot 0,55} \cong 4,26 \text{ m}^2$$

sprawdzenie zgodności podstawienia jednostek: $A_{KOL_STC} = \frac{Q_{DOP}}{G_{STC} \cdot \tau_{t_{WIECZ}} \cdot \eta_{KOL}} = \frac{\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot \text{s}}{\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \cdot \text{s}} = \text{m}^2$

Odpowiedź: Temperatura wody w zasobniku pod koniec dnia (pierwszego) t_{KD} , wynosi $61,5^\circ\text{C}$, temperatura wody w zasobniku rano następnego dnia $t_{RANO} = 55,4^\circ\text{C}$, ilość energii, która należy dostarczyć do zasobnika w kolejnym dniu, aby osiągnąć wieczorem temperaturę wody $t_{WIECZ} = 75^\circ\text{C}$ – $Q_{DOP} = 13,5 \text{ MJ}$. Aby tę energię doprowadzić do zasobnika ciepła w ciągu 2 h, musielibyśmy dysponować powierzchnią kolektorów $A_{KOL_STC} = 3,41 \text{ m}^2$ w warunkach STC i $A_{KOL_NOCT} = 4,26 \text{ m}^2$ w warunkach NOCT.