



POLITYKA ENERGETYCZNA – ENERGY POLICY JOURNAL

2017 ♦ Tom 20 ♦ Zeszyt 4 ♦ 117–128

ISSN 1429-6675

Artur GRABSKI\*, Janusz LASEK\*, Jarosław ZUWAŁA\*\*

## Koncepcja i modelowanie układu magazynowania energii z wykorzystaniem pieca metalurgicznego do topienia aluminium

**STRESZCZENIE:** W pracy przedstawiono koncepcję, model matematyczny oraz obliczenia symulacyjne dynamiki układu magazynowania energii elektrycznej wykorzystującego ciepło zgromadzone w rozgrzanym metalu, w metalurgicznym piecu do topienia aluminium. Przyjęto, iż do odzysku energii elektrycznej zastosowany będzie układ pracujący na zasadzie organicznego cyklu Rankine'a (ORC). Analizie poddano również właściwości obiegu pośredniego pomiędzy układem magazynowania a odzysku. Przedstawiono przykładowy scenariusz ładowania przy uwzględnieniu rzeczywistej charakterystyki czasowej konwersji energii elektrycznej za pomocą farmy wiatrowej. Założono przy tym hipotetyczną charakterystykę zapotrzebowania na energię elektryczną przez użytkownika. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, z których wynika, że układ taki znakomicie nadaje się do stabilizacji zmiennej charakterystyki wytwarzania w odniesieniu do zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną oraz ciepło. Przedstawiono wyniki przebiegów czasowych ładowania pieca energią uzyskaną z farmy wiatrowej oraz rozładowania przez hipotetycznego użytkownika. Podano również charakterystyki zmienności ciepła akumulowanego w piecu, temperatury czynnika magazynującego, sprawności. W obliczeniach uwzględniono również wpływ oporu cieplnego izolacji na charakterystyki magazynowania energii. Zauważono, iż kluczowymi parametrami wpływającymi na sprawność układu są charakterystyka użytkownika układu (głównie czas oczekiwania na rozładowanie oraz ilość zmagazynowanej energii) oraz jakość izolacji termicznej pieca.

**SŁOWA KLUCZOWE:** magazynowanie energii, piec metalurgiczny, inercyjne wygładzanie przebiegów

---

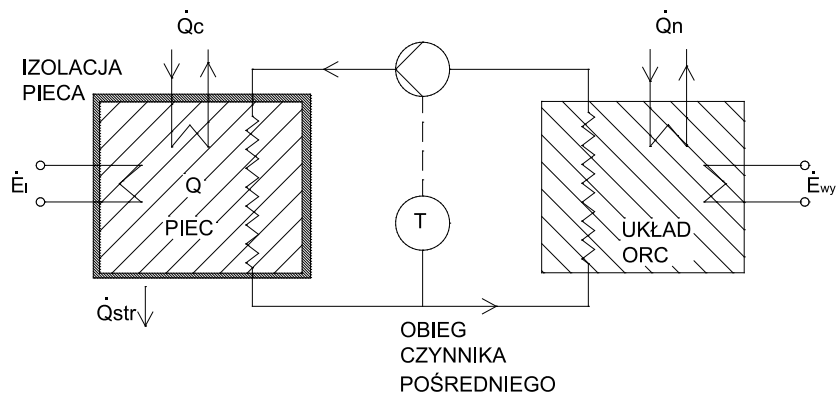
\* Dr inż., \*\* Dr hab. inż. – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze, agrabski@ichpw.pl

## Wprowadzenie

Magazynowanie energii wynika z potrzeb związanych z konwersją (przetwarzaniem) i wykorzystaniem energii. Jedną z przyczyn konieczności magazynowania są zmienne w czasie i niestabilne źródła energii. Dotyczy to głównie tzw. odnawialnych źródeł energii, np. konwersji energii poprzez wykorzystanie turbin wiatrowych (Bilgili i in. 2015). Celem artykułu jest przedstawienie analizy symulacyjnej układu do magazynowania i wygładzania przebiegów strumienia energii elektrycznej i ciepła opartego na komercyjnym piecu do topienia aluminium (indukcyjnym lub oporowym) wraz z układem odzysku energii elektrycznej.

### 1. Schemat i opis zasadniczych elementów układu

Układ analizowany w prezentowanym tu artykule, przedstawiony na rysunku 1. Układ ten składa się z dwóch urządzeń – magazynu energii oraz układu odzysku energii. Przyjęto, iż magazynowanie energii odbywa się przy wykorzystaniu elektrycznego pieca metalurgicznego do topienia aluminium. Założono, iż zakres temperatury działania pieca wynosi od 300 do 900°C. W celach demonstracyjnych zakłada się, iż będzie to piec o małych rozmiarach zawierający w sobie około 1 tony aluminium. W tym zakresie temperatur można zakumulować ciepło w ilości 921 MJ/Mg czyli 2,45 GJ/m<sup>3</sup> (~681 kWh/m<sup>3</sup>) dla aluminium w postaci stałej. Gęstość zakumulowanej w ten sposób energii znajduje się w czołówce metod akumulacji energii (Van Essen i in. 2009; Zhang i in. 2016). Do odzysku energii elektrycznej proponuje się układ ORC oparty na organicznym cyklu Rankine'a (Quoilin i in. 2013). Energię na sposób ciepła (podgrzanie wody) można odzyskać w zewnętrznym wymienniku ciepła. Założono, iż w układzie możliwe jest zastosowanie pieca indukcyjnego lub oporowego. Piece metalurgiczne różnych wielkości, do wytapiania aluminium znajdują się w ofercie wielu wytwórców. Konstrukcje takich pieców są dobrze opracowane i nie stwarzają obecnie problemów technicznych. Adaptacja do układu magazynowania wymusza poddanie pieca procesowi rekonstrukcji w celu umieszczenia w jego wnętrzu rury lub małej wężownicy, aby uzyskać możliwość ogrzewania medium pośredniego. Z uwagi na duży współczynnik przenikania ciepła z aluminium do czynnika pośredniego (np. cyny) zakłada się, że wymiary rury (wężownicy) nie będą zbyt duże. Wymagana powierzchnia wymiennika to ~1–3 m<sup>2</sup>, a długość rury wężownicy wynosi ~30–100 m. Wymiary te określono na podstawie szacunkowych obliczeń. Pewnym wyzwaniem jest zapewnienie jak najlepszej izolacji termicznej układu, zwłaszcza pieca. Z uwagi na bogatą ofertę rynkową pieców istnieje możliwość zestawiania układu z różnych wielkościowo pieców. Z pośród analizowanych metali, aluminium posiada pożądane właściwości w postaci stosunkowo wysokiej pojemności cieplnej, temperatury topnienia i ceny. Nie jest wykluczone, że w przyszłości zostaną opracowane stopy



Rys. 1. Schemat układu magazynowania energii w oparciu o piec i układ ORC,  $\dot{Q}_c$  – strumień ciepła użytkowego uzyskiwane z pieca,  $\dot{E}_i$  – moc elektryczna dostarczana do pieca,  $\dot{E}_{wyl}$  – moc elektryczna uzyskiwana z układu,  $\dot{Q}_{str}$  – strumień ciepła strat,  $\dot{Q}_n$  – strumień ciepła chłodzenia ORC

Fig. 1. Scheme of the energy storage system based on the furnace and ORC system,  $\dot{Q}_c$  – utility heat stream from the furnace,  $\dot{E}_i$  – electrical power supplied to the furnace,  $\dot{E}_{wyl}$  – electrical power obtained from the system,  $\dot{Q}_{str}$  – heat loss stream,  $\dot{Q}_n$  – ORC cooling heat stream

o właściwościach bardziej korzystnych na potrzeby niniejszego układu. Układy ORC są produkowane i dostępne na rynku od kilku lat (Quoilin i in. 2013). Przeważnie stosuje się je do odzysku energii ze źródeł o relatywnie niskiej temperaturze. W przypadku opisywanym w niniejszej pracy układ ORC będzie w stanie odzyskiwać energię elektryczną nawet w sytuacji słabego załadowania pieca – w temperaturze niewiele wyższej od 300°C w piecu. Przyjęto w artykule pewne uproszczenie. Termin „temperatura w piecu” dotyczy w istocie temperatury czynnika magazynującego, czyli aluminium, które podlega cyklicznemu ogrzewaniu i chłodzeniu.

Układ ORC dobiera się na podstawie informacji o zapotrzebowaniu mocy przez odbiorców. Układy takie oferowane są przez wielu dostawców w różnych wielkościach nawet bardzo małych np. 30 kW. Stwarza to możliwość skonfigurowania układu piec–ORC dostosowanego do potrzeb pojedynczego gospodarstwa domowego. W wyniku chłodzenia układu ORC możliwe jest pozyskanie ciepła  $\dot{Q}_n$ , w niskiej temperaturze (poniżej 100°C), które można zagospodarować. Z powodu niskiej temperatury, ciepło chłodzenia układu ORC  $\dot{Q}_n$  nie zawsze można uwzględniać do obliczeń sprawności termicznej układu. Jako alternatywę dla układu ORC można rozpatrywać inne metody odzysku np. silnik Stirlinga (Walker 1980) lub mikroturbinę parową. Układ magazynowania (piec) i układ odzysku energii (ORC) połączony jest przez obieg pośredni. Obieg ten służy przekazaniu ciepła pomiędzy układem pieca i układem ORC, a także dostosowaniem parametrów termicznych charakterystycznych dla danego urządzenia. Zakłada się, że temperatura w piecu może przyjmować wartości z zakresu od 300 do 900°C, przy czym układ ORC wymaga utrzymywania temperatury w piecu na poziomie nie niższym niż 300°C. Wynika to z przyjętego założenia temperatury medium ORC (tj. 200°C), którym jest 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane (HF-

C-245fa). W związku z tym obieg pośredni, zaznaczony symbolicznie na schemacie może mieć w rzeczywistości bardziej skomplikowaną formę. Możliwe jest również zastosowanie innych materiałów jako czynnika pośredniego np. ciekłej cyny lub innych metalicznych stopów niskotemperaturowych.

Dla odzysku energii na sposób ciepła służyć może wymiennik ciepła pomiędzy medium pośrednim a wodą użytkową. Przyjęcie koncepcji odzysku energii wprost z pieca z pominięciem czynnika pośredniego jest także możliwe, jednakże może być on kłopotliwy ze względu na możliwość pojawienia się wysokich temperatur w piecu i w konsekwencji przejście przemiany fazowej woda–para wodna w węzownicy.

## 2. Model matematyczny procesu

Dla potrzeb modelowania skupiono się na inercyjnej dynamice pieca. Dynamika obiegu pośredniego oraz układu ORC zostały pominięte.

W dalszej części będą stosowane następujące oznaczenia:  $\dot{Q}_p$  – ciepło ładowania/rozładowania pieca,  $\eta_{ORC}$  – sprawność elektryczna układu ORC – przyjęto 17% netto (Quoilin i in. 2013),  $\dot{Q}_{str}$  – ciepło strat do otoczenia przez izolowaną obudowę pieca,  $\eta_l$  – sprawność układu ładowania do pieca, gdzie:  $t_{max}$  – temperatura maksymalna w piecu, z uwagi na ograniczenia techniczne pieców dostępnych na rynku zakłada się, iż  $t_{max} = 900^\circ\text{C}$ ,  $t_{min} = 300^\circ\text{C}$  – temperatura minimalna w piecu przy której można odzyskiwać energię,  $t$  – temperatura wsadu pieca,  $\tau$  – czas,  $Q$  – ciepło zgromadzone w piecu (użyteczne),  $Q_{pmin}$  – ciepło użyteczne w temperaturze przemiany gdy cały metal jest w fazie stałej,  $Q_{pmin} = mc_{p_{st}}(t_p - t_{min})$ ,  $Q_{pmin} = 360 \text{ MJ}$ ,  $Q_{pmax}$  – ciepło użyteczne w temperaturze przemiany gdy cały metal jest w fazie ciekłej,  $Q_{pmax} = Q_{pmin} + m r_p$ ,  $Q_{pmax} = 681 \text{ MJ}$ ,  $r_p$  – ciepło przemiany fazowej aluminium  $321 \text{ kJ/kg}$ ,  $c_{p_{st}}$  – pojemność cieplna właściwa stałego aluminium  $0,92 \text{ kJ/(kgK)}$ ,  $c_{p_l}$  – pojemność cieplna właściwa ciekłego aluminium  $1 \text{ kJ/(kgK)}$ ,  $m$  – masa aluminium w piecu,  $m = 1000 \text{ kg}$ . Założono niezależność ciepła właściwego od temperatury.

Model układu obejmuje równania bilansów strumieni energii w określonych etapach procesu. Etapy te zależą od przebiegu ładowania i rozładowania. Zakłada się, że ładowanie i rozładowanie zależą od czynników zewnętrznych. Ładowanie uzależnione jest od zmiennej w czasie charakterystyki wytwarzania (konwersji) energii elektrycznej – w tym przypadku farmy wiatrowej. Rozładowanie odbywa się na podstawie założonego scenariusza zapotrzebowania na ciepło i energię elektryczną przez hipotetycznego użytkownika. Wyodrębniono następujące etapy procesu magazynowania:

- ◆ Etap ładowania. W czasie ładowania następuje dostarczenie energii elektrycznej do układu, w którym następuje konwersja energii (poprzez grzanie elektryczne) i przyrost energii wewnętrznej układu. Na każdym etapie, czyli także w czasie ładowania stale następują straty energii do otoczenia.

$$\dot{Q}_p = \eta_l \dot{E}_l - \dot{Q}_{str} \quad (1)$$

- ◆ Etap rozładowania. W tym czasie układ traci zgromadzoną energię pozyskaną w wyniku konwersji energii elektrycznej. Odbiorcy zewnętrzni mają możliwość pozyskiwania energii elektrycznej i ciepła. Rozładowanie odbywa się zawsze, nawet przy zerowym odbiorze energii w związku ze stratami do otoczenia. Dobra izolacja jest w stanie mocno ograniczyć te straty.

$$\dot{Q}_p = -\frac{\dot{E}_{wyl}}{\eta_{ORC}} - \dot{Q}_c - \dot{Q}_{str} \quad (2)$$

- ◆ Etap jednoczesnego ładowania i rozładowania. W czasie pracy układu będą z pewnością zdarzały się sytuacje, gdy w czasie ładowania np. z farmy wiatrowej towarzyszy zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło. Bezpośrednie zasilanie przez farmę wiatrową naraża użytkownika na szybkie zmiany mocy w czasie. Układ w tym przypadku pozwala na pozyskiwanie ciepła na przyjętym poziomie i zapewnienie stabilizacji wykorzystania zmagazynowanej energii.

$$\dot{Q}_p = \eta_l \dot{E}_l - \frac{\dot{E}_{wyl}}{\eta_{ORC}} - \dot{Q}_c - \dot{Q}_{str} \quad (3)$$

- ◆ Oczekiwanie. Jest to najbardziej niekorzystny etap z punktu widzenia użytkownika układu, ponieważ układ nie jest w tym czasie ładowany, co grozi pełnym wychłodzeniem. Nie jest też rozładowany w związku z czym nie prowadzi się odzysku energii. Układ ponosi straty do otoczenia.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{str} \quad (4)$$

W zależności od zakresu temperatury w piecu, związanej z przejściem fazowym ze stanu stałego do ciekłego, zmianę temperatury wsadu pieca oblicza się według równań 5–7. W zależności od zakresu temperatur bilans ciepła określa się na podstawie zależności:

Równanie bilansu strumienia energii 5:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \dot{Q}_p \quad (5)$$

Równania określające temperaturę w piecu w zależności od stanu przemiany fazowej:

- ◆ w temperaturach niższych od temperatury przemiany fazowej aluminium – faza stała – równanie 6:

$$\begin{cases} t_{\min} \leq t < t_p \\ mcp_{st} \frac{d}{d\tau} t = \dot{Q}_p \end{cases} \quad (6)$$

- ◆ w temperaturze przemiany fazowej zestalania i topnienia – równanie 7:

$$\begin{cases} Q_{p \min} < Q < Q_{p \max} \\ t = t_p \end{cases} \quad (7)$$

- ◆ w temperaturach wyższych od temperatury przemiany fazowej aluminium – faza ciekła – równanie 8:

$$\begin{cases} t_p < t < t_{\max} \\ mcp_l \frac{d}{d\tau} t = \dot{Q}_p \end{cases} \quad (8)$$

Zakłada się, że najniższa użyteczna temperatura, przy której możliwe jest prowadzenie odzysku energii elektrycznej wynosi 300°C. Temperatura ta wynika z racjonalnej wymiany ciepła w węzownicy w piecu, w której znajduje się czynnik pośredni. Ogrzany czynnik pośredni do 250°C przekazuje ciepło do układu ORC, pracującego w temperaturze zbliżonej do 200°C. W wariantcie odzysku samego ciepła bez konwersji energii do energii elektrycznej (bez układu ORC) można przekazywać ciepło pomiędzy piecem a wodą.

Ciepło strat określone jest trójpunktową zależnością (9) na podstawie danych ze strony jednego z producentów pieców do wytapiania – LAC (lac, 2017), dla modelu o wsadzie jednej tony aluminium.

$$\dot{Q}_{str} = at^2 + bt + c \quad (9)$$

Wyznaczone współczynniki wynoszą:  $a=6 \cdot 10^{-6} (\text{kW}/^\circ\text{C}^2)$ ,  $b=2,8 \cdot 10^{-3} (\text{kW}/^\circ\text{C})$ ,  $c=-5,81 \cdot 10^{-2} (\text{kW})$ .

Sprawność elektryczną układu określono jako stosunek mocy dostarczonej do mocy uzyskanej z układu – równanie 10a.

$$\eta_{el}(\tau) = \frac{\int_0^\tau \dot{E}_{wyl} d\tau}{\int_0^\tau \dot{E}_l d\tau} = \eta_{ORC} \frac{\int_0^\tau \dot{Q}_c d\tau}{\int_0^\tau \dot{E}_l d\tau} \quad (10a)$$

Sprawność skojarzona (termiczna i elektryczna) układu może zostać zwiększona przy założeniu wykorzystania ciepła niskotemperaturowego z układu ORC, co uwzględniono w równaniu 10b. Sprawność całkowita nie osiąga wartości 100% z powodu strat ciepła pieca do otoczenia.

$$\eta(\tau) = \frac{\int_0^\tau \dot{E}_{wyl} d\tau + \int_0^\tau \dot{Q}_c d\tau + \int_0^\tau \dot{Q}_n d\tau}{\int_0^\tau \dot{E}_l d\tau} \quad (10b)$$

Wykorzystanie tzw. ciepła niskotemperaturowego z układu ORC dotyczy nielicznych przypadków, np. odzysku rekuperacyjnego w instalacjach komunalnych lub w pewnych technologiach produkcji chemicznej. Najczęściej ciepło to jest, niestety, tracone z uwagi na konieczność chłodzenia czynnika roboczego.

Warunki początkowe:

$$\begin{cases} \tau = 0s \\ t = 300^{\circ}C \\ Q = 0MJ \end{cases} \quad (11)$$

### 3. Założenia

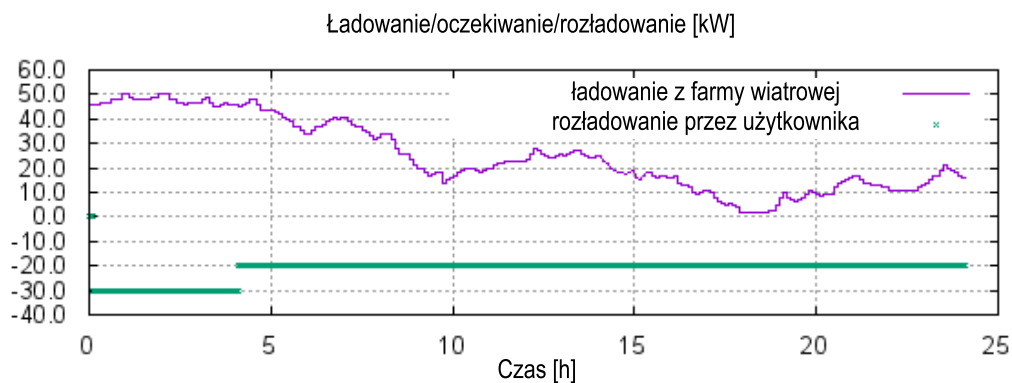
Układ składa się z niewielkiego pieca zawierającego 1 tonę aluminium. Piec taki charakteryzuje się małymi gabarytami i może być stosowany jako urządzenie domowe. Układy większej skali przeważnie charakteryzują się mniejszymi stratami jednostkowymi (np. straty ciepła do otoczenia) więc ich sprawność powinna być wyższa. Sprawność układu ładowania (konwersji energii elektrycznej na ciepło) przyjęto na poziomie 95%. Układ rozładowania pieca – ORC ma moc około 30 kW i szeroki zakres pracy. Zakłada się ponadto, że układ ORC pracuje w zakresie temperatur 200–210°C. Model obiegu pośredniego jest pominięty, zakłada się zerowe straty związane z transportem gorącego czynnika do układu ORC.

### 4. Metody rozwiązania układu równań

Całkowanie modelu matematycznego (rów. 1–10) dokonano za pomocą własnego programu w otoczeniu FORTRAN, w którym zaimplementowano metodę Eulera 1 rzędu. Krok czasowy przyjęto 0,001 s. Układ charakteryzuje się dużą inercją (dużą stałą czasową) w związku z tym zastosowanie metody 1 rzędu nie prowadzi do powstania dużych błędów numerycznych. Program testowano dla różnych przypadków. Każda z symulacji trwała zaledwie kilka sekund.

## 5. Wyniki

Założono, że istnieje hipotetyczny użytkownik ciepła i energii elektrycznej. Użytkownik ten jest podłączony elektrycznie do farmy wiatrowej. Pobiera on energię elektryczną o bardzo niestabilnej charakterystyce mocy. Wspomniany użytkownik ma dostęp do 0,1% mocy z farmy. Na rysunku 2 przedstawiono realny przebieg 0,1% mocy elektrycznej z kanadyjskiej farmy wiatrowej (dane z 16.03.2014) (Ibrahim i in. 2008) wraz z hipotetycznym przebiegiem rozładowania układu przez użytkownika. Dla uproszczenia zakłada się, że użytkownik w pierwszych 4 godzinach będzie pobierał 30 kW energii, a następnie przez kolejne 20 godzin obniży swoje zapotrzebowanie do poziomu 20 kW. Z przedstawionego diagramu można zauważyć, iż użytkownik nie odczuwa intensywnych zmian mocy energii elektrycznej dostarczanej z farmy wiatrowej do układu. Jest to główna zaleta omawianego układu. Układ ten przez swój inercyjny charakter jest w stanie pobierać moc o bardzo niestabilnej charakterystyce ze źródła oraz zasilać w sposób stabilny odbiorcę. Ładowanie z farmy wiatrowej –  $\dot{E}_l$ , rozładowanie przez użytkownika –  $\dot{Q}_c$ .



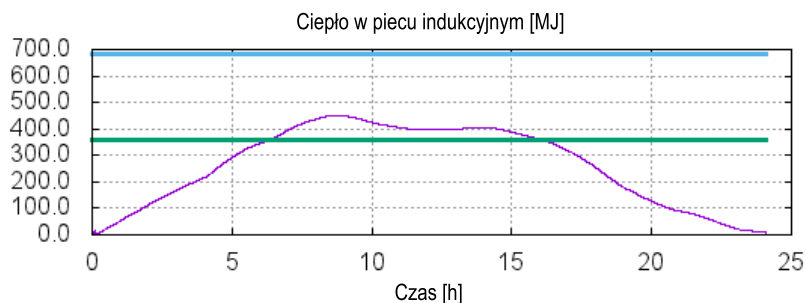
Rys. 2. Przebieg ładowania układu z kanadyjskiej farmy wiatrowej 16.03.2014 (Ibrahim i in. 2008) oraz rozładowania przez użytkownika

Fig. 2. Charging cycle of the circuit from the Canadian wind farm March 16, 2014 and discharge by the user

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian ciepła w piecu oraz linie  $Q_{pmin} = 360$  MJ,  $Q_{pmax} = 681$ . Na wykresie widać, że w omawianym przebiegu ładowanie–rozładowanie nie doszło do całkowitego stopienia aluminium wewnątrz pieca.

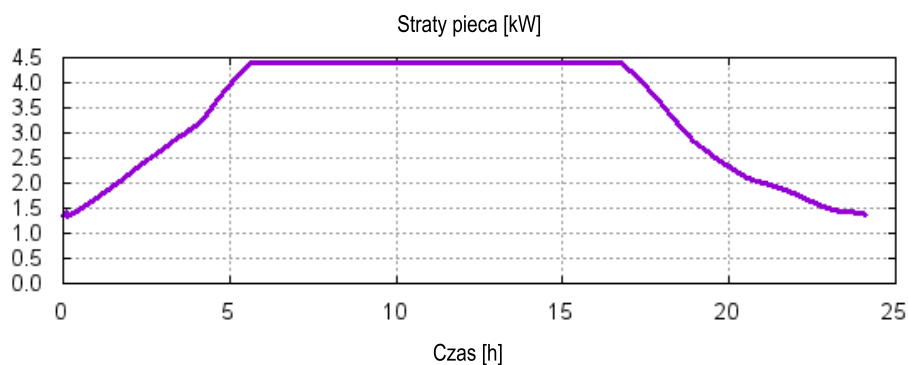
Wartość uzyskiwanej temperatury w piecu posiada bezpośredni wpływ na straty energii do otoczenia. Straty te wyznaczone zostały na podstawie zależności 9. Przebieg strat pokazano na rysunku 4. Straty zależą od temperatury pieca. W zakresie ciepła pomiędzy  $Q_{pmin}$  oraz  $Q_{pmax}$  utrzymują się na stałym poziomie około 4,5 kW z powodu stałej temperatury w piecu – temperatury przemiany fazowej. Jak widać, straty występują również dla całkowicie rozładowanego





Rys. 3. Ciepło użyteczne w piecu

Fig. 3. The useful heat in the furnace

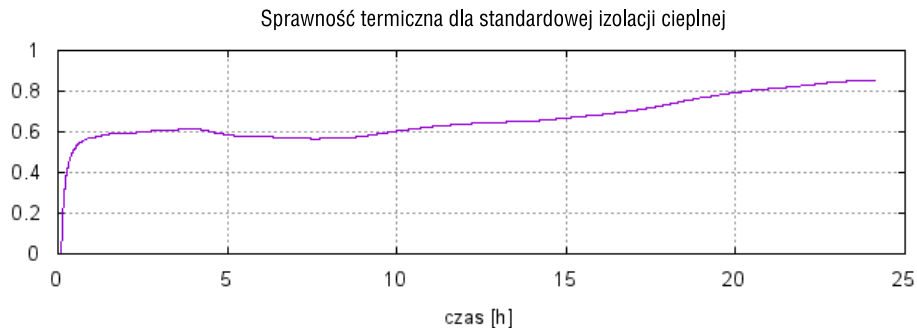


Rys. 4. Przebieg strat do otoczenia poprzez izolację pieca

Fig. 4. The course of losses to the environment through the insulation of the furnace

pieca. Układ rozładowany charakteryzuje się stratami na poziomie 1,5 kW. Obniżenie strat do otoczenia jest jednym z głównych wyzwań w omawianym układzie magazynowania energii.

Na rysunku 5 pokazano sprawność dynamiczną układu, obliczoną wg równania 10b. Sprawność ta jest w swej istocie miarą stosunku energii, którą odzyskano do energii i dostarczone do układu. W początkowym okresie dominowało ładowanie układu nad pobieraniem energii w związku z tym sprawność przybierała przez pierwsze 10 godzin wartości od 0 do około 60%. Jej wartość zmienia się w czasie trwania procesu i pokazuje, ile energii odzyskano, gdyby np. wyłączyć układ w 15. godzinie pracy – dla tego okresu odzyskano około 70% energii, którą doprowadzono do układu. Gdyby nie prowadzono dalej procesu odzysku, to układ uległby schłodzeniu; natomiast pozostałe 30% energii stanowiłoby stratę układu. Ponieważ proces prowadzono dalej aż do 24. godziny, w późniejszych godzinach dominowało odbieranie energii nad dostarczaniem – sprawność dynamiczna układu rosła. Dla ostatniego okresu piec uległ prawie całkowitemu rozładowaniu (rys. 3 godzina 24 procesu), sprawność osiąga swoją maksymalną wartość – 84%. Pozostała część energii, czyli 16%, uległa rozproszeniu poprzez izolację ter-

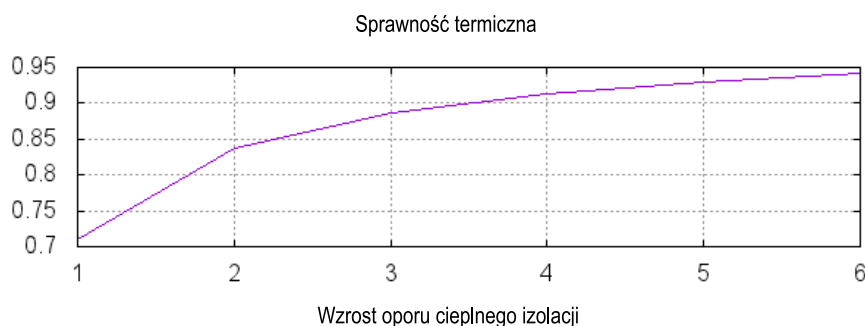


Rys. 5. Przebieg sprawności układu odzysku ciepła (równanie 10b)

Fig. 5. Performance of the heat recovery system (equation 10b)

miczną układu. Ponieważ sprawność dynamiczna zależy od przebiegu ładowania i rozładowania, nie jest wielkością niezmienną przypisaną do konkretnego rozwiązania technologicznego pieca. Im bardziej racjonalnie korzysta się z układu, tym ta sprawność jest większa.

Ponieważ straty pieca do otoczenia są bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na sprawność, przeprowadzono ocenę wrażliwości modelu (wielkości strat układu) ze względu na  $n$ -krotne polepszenie parametrów izolacji. Poprawa izolacji oznacza  $n$ -krotność zwiększenia oporu cieplnego izolacji. Na rysunku 6 pokazano wartości sprawności pieca, w przypadku scenariusza ładowania/rozładowania przedstawionego na rysunku 2, w momencie końcowym okresu bilansowania (tj. na końcu przedziału – gdy piec jest całkowicie rozładowany w 24 .godzinie). Z uwagi na polepszenie izolacji termicznej układu czas rozładowania ulegał niewielkiemu wydłużeniu w kolejnych symulacjach. Zgodnie z oczekiwaniem sprawność rośnie osiągając wartość ponad 96% dla izolacji, której opór cieplny jest sześciokrotnie wyższy od pierwotnie zastosowanego. Poprzez polepszenie właściwości izolacji rozumie się  $n$ -krotne obniżenie strumienia strat do otoczenia wyznaczonego z równania 9. Polepszenie właściwości izolacyjnych może polegać na zwiększeniu grubości izolacji lub zastosowaniu materiału o mniejszym współczynniku przewodzenia. Rozważa się w tym zastosowanie izolacji próżniowej, podobnie jak w zbiornikach kriogenicznych.



Rys. 6. Sprawność układu w miarę wzrostu oporu cieplnego izolacji

Fig. 6. Efficiency of the system as the resistance of the heat insulation is increased

## Podsumowanie

Ocenia się, iż technologia magazynowania energii w piecu do topienia aluminium może być bardzo konkurencyjna w przypadku jej aplikacji w miejscach, gdzie nie udaje się zastosować innych metod magazynowania (np. elektrowni szczytowo-pompowych), gdzie występuje zwiększone zapotrzebowanie na ciepło (obszary o szerokości geograficznej powyżej 50°), z możliwością integracji układu z turbinami wiatrowymi (obszary charakteryzujące się stosunkowo silnymi, ale nie koniecznie stabilnymi wiatrami). Dodatkowym atutem układu jest możliwość jego skalowania (łączenia kilku, kilkunastu pieców w moduły), rozbudowy i konfiguracji dostosowanej do potrzeb przy założeniu jego skonstruowania w formie kompaktowej, np. w kontenerze. Inną zaletą układu jest możliwość pobierania mocy ze źródła o bardzo niestabilnej charakterystyce oraz zasilanie w sposób stabilny odbiorcą. Kluczowymi parametrami wpływającymi na sprawność układu są charakterystyka użytkownika układu (głównie czas oczekiwania na rozładowanie oraz ilość zmagazynowanej energii) oraz jakość izolacji termicznej pieca.

Zaprezentowane w niniejszej publikacji wyniki badań zostały uzyskane podczas realizacji projektu badawczego nr 11.16.014 pt.: „Magazynowanie energii – identyfikacja perspektywicznych obszarów rozwoju dziedziny”, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego w ramach dotacji na utrzymanie potencjału badawczego.

## Literatura

- BILGILI i in. 2015 – BILGILI, M., OZBEK, A., SAHIN, B. i KAHRAMAN, A. 2015. An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, s. 323–334.
- IBRAHIM i in. 2008 – IBRAHIM, H., ILINCA, A. i PERRON, J. 2008. Energy storage systems – Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(5), s. 1221–1250.
- lac. (2017). [Online] Dostępne w: <http://old.lac.cz/pl/produkty/> Dostęp: 13.07.2017].
- QUOILIN i in. 2013 – QUOILIN, S., BROEK, M.V.D., DECLAYE, S., DEWALLEF, P. i LEMORT, V. 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, s. 168–186.
- VAN ESSEN i in. 2009 – VAN ESSEN, V., ZONDAG, H., GORES, J.C., BLEIJENDAAL, L., BAKKER, M., SCHUITEMA, R., VAN HELDEN, W., HE, Z. i RINDT, C. 2009. Characterization of MgSO<sub>4</sub> hydrate for thermochemical seasonal heat storage. *Journal of solar energy engineering* 131(4), 041014.
- WALKER, G. 1980. *Stirling engines*: Clarendon Press.
- ZHANG i in. 2016 – ZHANG, H., BAEYENS, J., CÁCERES, G., DEGRÈVE, J. i LV, Y. 2016. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science* 53, s. 1–40.

Artur GRABSKI, Janusz LASEK, Jarosław ZUWAŁA

## Concept and modeling of the storage system using a metallurgical furnace

### Abstract

The paper presents a concept, a mathematical model and simulation calculations of the dynamics of the storage of electric energy using heat collected in heated metal in a metallurgical melting furnace of aluminum. It was assumed that a system based on the organic Rankine cycle (ORC) would be used for the recovery of electricity. The properties of the intermediate circuit between the storage system and the recovery were also analyzed. An example charging scenario is presented, taking the actual time characteristics of the electricity conversion using a wind farm into account. This assumes the hypothetical characteristics of the user's electricity demand. The results of the numerical calculations show that this arrangement is excellent for stabilizing the variable production curve with respect to the demand for electricity and heat. The results of furnace charging with the energy obtained from the wind farm and the discharge by the hypothetical user are presented. The characteristics of the heat accumulation in the furnace, the temperature of the storage medium and the efficiency are also given. The calculations also take the influence of insulation resistance on the energy storage characteristics into account. It has been noted that the key parameters influencing the efficiency of the system are the characteristics of the system (mainly the waiting time for the discharge and the amount of stored energy) and the quality of thermal insulation of the furnace.

KEYWORDS: energy storage, metallurgical furnace, inertial smoothing