

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Streszczenie rozprawy doktorskiej

**Wyznaczenie charakterystyk alkalicznego generatora
wodoru**

mgr inż. Michał Jurczyk

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz

Promotor Pomocniczy: dr inż. Włodzimierz Ogulewicz

Gliwice 2018

Autor: mgr inż. Michał Jurczyk
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 18 Gliwice 44-100
email: Michal.Jurczyk@polsl.pl

Promotor: Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 18 Gliwice 44-100
email: Janusz.Kotowicz@polsl.pl

Promotor Pomocniczy: dr inż. Włodzimierz Ogulewicz
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
ul. Konarskiego 18 Gliwice 44-100
email: ogulew33@interia.pl

Oświadczenie:

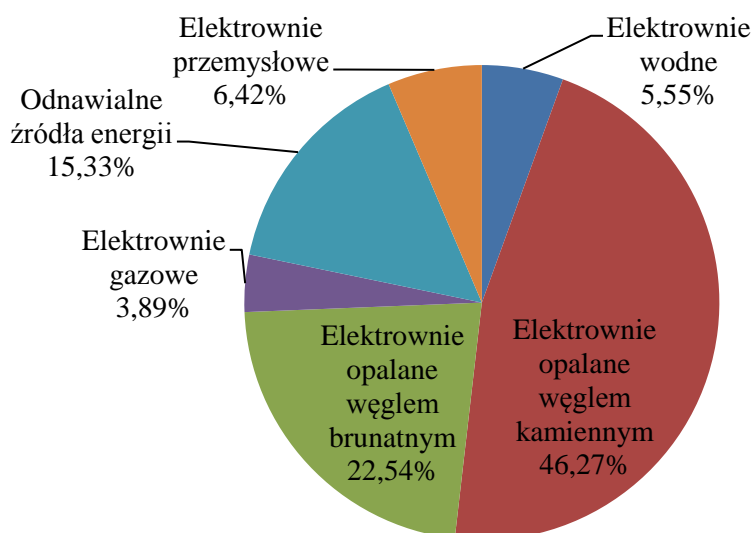
Część wyników zaprezentowanych w pracy doktorskiej została uzyskana z badań współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu "*GEKON - Magazynowanie energii w postaci wodoru w kawernach solnych*".

Spis treści

1.	Wstęp.....	5
2.	Instalacje Power to Gas oraz Power to Gas to Power	6
3.	Elektroliza wody	8
4.	Elektrolizery AEM.....	9
5.	Motywacja i cele rozprawy doktorskiej.....	10
	5.1. Motywacja podjęcia badań.....	10
	5.2. Cele rozprawy doktorskiej.....	10
6.	Obiekt badań	12
	6.1. Moduł zasilania	12
	6.2. Moduł elektrolizerów	12
	6.3. Moduł osuszania gazu	13
7.	Charakterystyki badanych urządzeń.....	14
	7.1. Stanowisko pomiarowe i mierzone parametry	14
	7.2. Charakterystyki elektrolizerów	14
	7.3. Wyznaczenie charakterystyk przetwornic AC/DC.....	16
8.	Charakterystyki generatora wodoru	18
9.	Rozruch urządzenia	20
10.	Reakcja urządzenia na zmianę parametrów zasilania	21
11.	Analiza niepewności pomiaru	23
	11.1. Metodologia wykonanych obliczeń.....	23
	11.2. Wyznaczenie niepewności standardowej typu A	23
	11.3. Wyznaczenie niepewności standardowej typu B, niepewności całkowitej oraz niepewności standardowej złożonej	24
	11.4. Wyznaczenie niepewności rozszerzonej	25
12.	Wyznaczenie granicznej ceny sprzedaży wodoru	26
13.	Wnioski szczegółowe.....	30
14.	Uwagi końcowe.....	32
	Literatura	34

1. Wstęp

Światowa energetyka opiera się głównie na surowcach kopalnych. Podobna sytuacja kształtuje się także w Polsce. Na Rys. 1.1 przedstawiono strukturę mocy zainstalowanej w KSE (Krajowym Systemie Elektroenergetycznym) w roku 2016 (stan na 31.12.2016) [1].



Rys. 1.1 Struktura mocy zainstalowanej w KSE

Pomimo faktu, iż surowce nieodnawialne stanowią podstawę funkcjonowania polskiej i światowej energetyki w ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny wzrost udziału OZE w strukturze KSE [2-5]. Udział elektrowni wiatrowych i słonecznych wykorzystujących ogniwa fotowoltaiczne w globalnej produkcji energii elektrycznej, jest na poziomie ok. 5%, ale od kilku lat przyrost mocy zainstalowanej w wymienionych instalacjach utrzymuje się na poziomie około 15-30% [6]. Odnawialne źródła energii, takie jak farmy wiatrowe czy też instalacje fotowoltaiczne charakteryzują się zmienną ilością energii elektrycznej dostarczanej do sieci, która zależy w głównej mierze od warunków pogodowych i może być niedostosowana do bieżących potrzeb systemu energetycznego. Działania instalacji opartych na OZE mogą wpływać niekorzystnie na pracę systemów energetycznych oraz wymuszać potrzebę zastosowania dodatkowych sposobów regulacji.

2. Instalacje Power to Gas oraz Power to Gas to Power

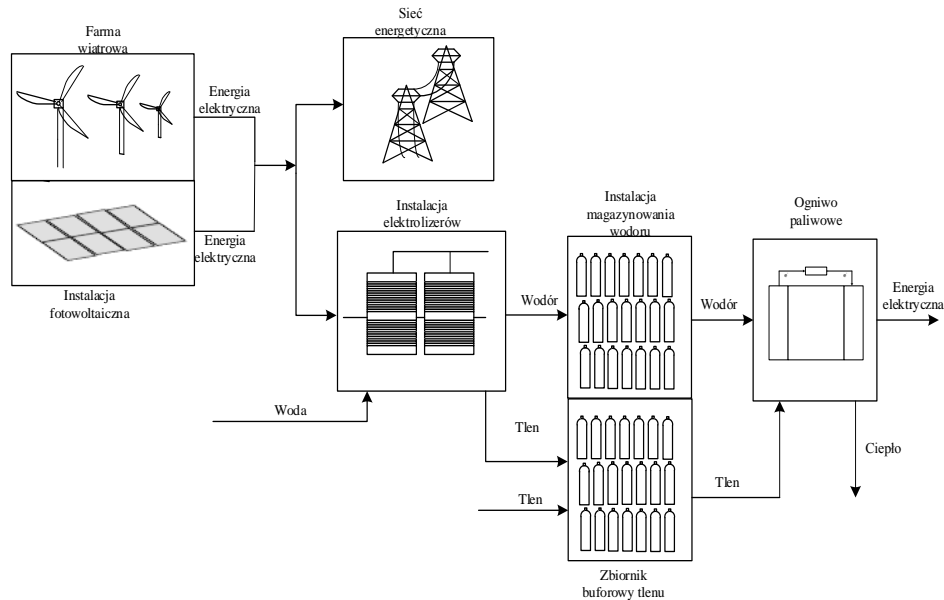
Fundamentalnym zadaniem instalacji magazynowania energii jest przechowywanie nadwyżek energii elektrycznej podczas jej nadmiaru w systemie elektroenergetycznym. Zmagazynowana energia może zostać z powrotem oddana do sieci, gdy zużycie energii elektrycznej przewyższa jej produkcję. Dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu potencjału instalacji przeznaczonych do magazynowania nadwyżek energii, ilość energii wytwarzanej przez konwencjonalne źródła nie musi być dostosowywana do chwilowego zapotrzebowania systemu. Pozwala to na efektywne wykorzystanie w KSE, zarówno elektrowni konwencjonalnych charakteryzujących się ograniczoną elastycznością, jak i odnawialnych źródeł energii. Obecnie występujące zmiany mocy w KSE pojawiające się przy współpracy systemów energetycznego z OZE są całkowicie kompensowane przez istniejące elementy sieci, jednak dalsze zwiększanie potencjału mocy zainstalowanej w tego typu jednostkach wymusza zastosowanie nowych instalacji jak i nowych rozwiązań technologicznych zapewniających lepszą elastyczność sieci [7].

Technologia Power to Gas umożliwia wytwarzanie gazu o dużym potencjale energetycznym. Ideą tej technologii jest wykorzystanie energii elektrycznej w okresie jej potencjalnej nadprodukcji. Najczęściej sytuacja taka występuje w systemach elektroenergetycznych w których duży procent mocy stanowią instalacje odnawialnych źródeł energii, dlatego też instalacje Power to Gas mogą być wykorzystywane w celach regulacji obciążenia systemów elektroenergetycznych [8].

Produktem końcowym powstałym w ramach funkcjonowania instalacji Power to Gas jest wodór, natomiast dodatkowy produkt handlowy może stanowić tlen. Wodór wytwarzany jest w procesie elektrolizy wody przeprowadzanej w obrębie generatora wodoru. Głównymi elementami instalacji są: elektrolizery wytwarzające wodór i tlen z wody (najczęściej o określonej czystości) wraz ze zbiornikami umożliwiającymi zmagazynowanie wytworzonego gazu. Możliwe jest również wtłaczanie wyprodukowanego wodoru w istniejącą sieć gazowniczą.

Instalacje Power to Gas to Power (P2G2P) umożliwiają ponowną konwersję wyprodukowanego wodoru w energię elektryczną. Jako generatory energii elektrycznej w większości przypadków wykorzystuje się ogniwa paliwowe typu PEM. Energetyczne wykorzystanie wodoru jest uzasadnione tylko w przypadku pozyskania tego pierwiastka w procesie elektrolizy wody, który wykorzystuje nadwyżki energii powstałe w instalacjach OZE współpracujących z KSE.

Istniejące instalacje P2G2P w porównaniu z innymi technologiami magazynowania energii, odznaczają się na dzisiaj stosunkowo niskimi sprawnościami, które nie przekraczają 40% [9]. Jest to spowodowane m.in. kilkukrotnym przetwarzaniem energii, stosunkowo niską sprawnością ogniw paliwowych oraz znaczącymi potrzebami własnymi urządzeń wchodzących w skład instalacji. Na Rys. 2.1 przedstawiono schemat Power to Gas to Power.



Rys. 2.1 Schemat instalacji Power to Gas to Power

Instalacje typu P2G oraz P2G2P są coraz częściej budowane i testowane jako układy umożliwiające magazynowanie energii pochodzącej z wiatru i promieniowania słonecznego. Instalacje te powstają przede wszystkim w krajach, w których losowo efektywne instalacje OZE mają istotny udział w produkcji energii elektrycznej. Pośród technologii wykorzystujących wodór jako nośnik energii można wskazać instalacje różniące się pochodzeniem energii elektrycznej kierowanej do procesu magazynowania. Wśród nich znajdują się układy autonomiczne, zasilane tylko energią wytworzoną w obrębie instalacji OZE lub układy współpracujące, w zakresie zakupu energii z KSE.

3. Elektroliza wody

Elektroliza wody stanowi fundamentalne rozwiązanie w przypadku wykorzystania energii z OZE do procesu wytwarzania wodoru. Sam proces elektrolizy wody polega na jej rozbięciu na dwa główne składniki, tlen i wodór. Reakcję tę przedstawiono równaniem (3.1).



Z procesem elektrolizy ściśle związane są prawa sformułowane przez Faradaya. Równaniem (3.2) przedstawiono pierwsze prawo elektrolizy Faradaya [10].

$$m = q \cdot k_e = I \cdot \tau \cdot k_e \quad (3.2)$$

gdzie:

m masa substancji wytworzona w procesie elektrolizy, kg

q ładunek elektryczny płynący przez elektrodę, C

k_e równoważnik elektrochemiczny, kg/C

I wartość natężenia prądu, A

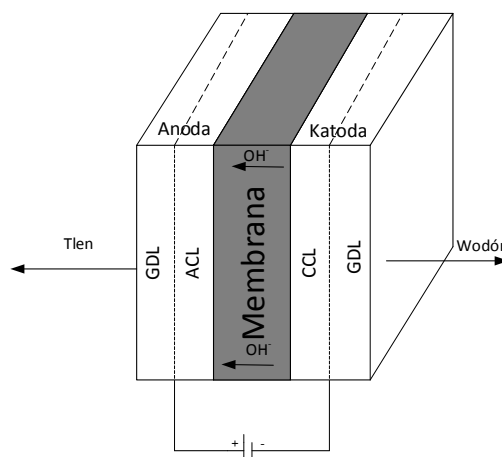
τ czas, s

Z zależności (3.2) wynika, iż masa wytworzonej substancji w procesie elektrolizy jest wprost proporcjonalna do wartości prądu przepływającego przez elektrolit oraz czasu trwania procesu.

Proces elektrolizy wody przeprowadzany jest w urządzeniach nazywanych elektrolizerami. Elektrolizer składa się z dwóch elektrod: elektrody dodatniej – anody, odpowiedzialnej za reakcję OER (*ang. Oxygen Evolution Reaction*) oraz elektrody ujemnej – katody przeprowadzającej reakcję HER (*ang. Hydrogen Evolution Reaction*).

4. Elektrolizery AEM

W elektrolizerach membranowych typu PEM (*ang. Proton Exchange Membrane*) oraz w typowych elektrolizerach alkalicznych jako katalizatory stosuje się zazwyczaj metale szlachetne i półszlachetne takie jak platyna, iryd, kobalt, nikiel czy też ruten. Wykorzystywanie takich materiałów związane jest z ponoszeniem znacznych kosztów, dlatego instalacje przeznaczone do przeprowadzania procesu elektrolizy wody charakteryzują się wysokimi nakładami inwestycyjnymi. Aby uniknąć potrzeby stosowania tak drogich pierwiastków należy ograniczyć korozyjne działanie elektrolitu, przy jednoczesnym zachowaniu podobnych parametrów pracy urządzenia. Takie rozwiązanie oferuje nowy typ elektrolizera - AEM (*ang. Anion Exchange Membrane*). Elektrolizery AEM pozwalają na pozyskanie wodoru w procesie elektrolizy wody przy zagwarantowaniu niższych kosztów aparatury [11,12]. Ze względu na zastosowanie nowych materiałów elektrolizery AEM mogą wytwarzać wodór o zbliżonej czystości (99,99%) i podobnym ciśnieniu (około 30 bar) jak dotychczas stosowane urządzenia, jednocześnie przy znacznym ograniczeniu korozyjnego oddziaływania elektrolitu. Cele elektrolizera można podzielić na poszczególne warstwy: warstwę dyfuzji gazów GDL (*ang. Gas Diffusion Layer*), a także warstwy katalityczne poszczególnych elektrod - ACL (*ang. Anode Catalyst Layer*) znajdującą się w obrębie anody oraz CCL (*ang. Cathode Catalyst Layer*) w obrębie katody. Elektrolizery AEM najczęściej pracują w środowisku alkalicznym (pH około 11) w którym jako elektrolit wykorzystuje się 1% roztwory K_2CO_3 lub $KHCO_3$, albo 1 molowy roztwór KOH. Na Rys. 4.1 przedstawiono schemat komórki elektrolitycznej typu AEM.



Rys. 4.1 Schemat komórki elektrolitycznej typu AEM

5. Motywacja i cele rozprawy doktorskiej

5.1. Motywacja podjęcia badań

Dynamiczny wzrost udziału OZE w produkcji energii elektrycznej warunkuje jednocześnie potrzebę rozwoju technologii magazynowania energii. Instalacje Power to Gas lub Power to Gas to Power mogą w przyszłości stanowić alternatywę dla obecnie najczęściej stosowanych instalacji szczytowo-pompowych, odpowiedzialnych za proces magazynowania nadwyżek energii w systemach elektroenergetycznych. Poznanie fundamentalnych zasad działania generatorów wodoru oraz ich reakcji na skokowe zmiany wartości natężenia prądu zasilającego jest kluczowe dla poprawnego projektowania instalacji Power to Gas oraz Power to Gas to Power.

Wyznaczone charakterystyki urządzenia mogą zostać wykorzystane w celu walidacji istniejących modeli matematycznych analogicznych typów urządzeń oraz stanowić podwaliny dla projektowania instalacji typu P2G lub P2G2P. Zaprezentowane w pracy charakterystyki zostały wykonane dla pełnego zakresu pracy generatora wodoru. Zbadanie urządzenia w całym zakresie jego działania oraz dla różnych stanów pracy pozwoli określić możliwość zasilania generatora wodoru ze źródeł charakteryzujących się zmienną ilością wytwarzanej energii elektrycznej, szczególnie pochodzącej z instalacji OZE.

Elektrolizery typu AEM są stosunkowo nową technologią, która wciąż wymaga intensywnych badań, ponieważ literatura przedmiotu dotycząca tej technologii wciąż jest uboga i wymaga poszerzenie między innymi o aspekty dotyczące sprawności i energochłonności tego typu urządzeń.

5.2. Cele rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej jest wyznaczenie charakterystyk generatora wodoru pracującego w środowisku alkalicznym wyposażonego w dwa elektrolizery typu AEM oraz określenie możliwości współpracy badanego urządzenia ze źródłami zasilania charakteryzującymi się zmienną w czasie ilością dostarczanej energii elektrycznej.

Główny cel rozprawy został osiągnięty w toku realizacji następujących celów cząstkowych:

- Budowa stanowiska pomiarowego,
- Wyznaczenie charakterystyk poszczególnych elektrolizerów pracujących w obrębie badanego urządzenia,

- Identyfikacja urządzeń pomocniczych generatora wodoru,
- Zbadanie wpływu wybranych parametrów na pracę urządzenia,
- Analiza różnych trybów pracy generatora,
- Reakcja urządzenia na skokowe zmiany wartości prądu zasilającego,
- Wyznaczenie niepewności pomiaru wielkości mierzonych,
- Analiza ekonomiczna zastosowania generatorów wodoru,
- Wpływ wybranych parametrów na charakterystyki ekonomiczne generatora wodoru.

6. Obiekt badań

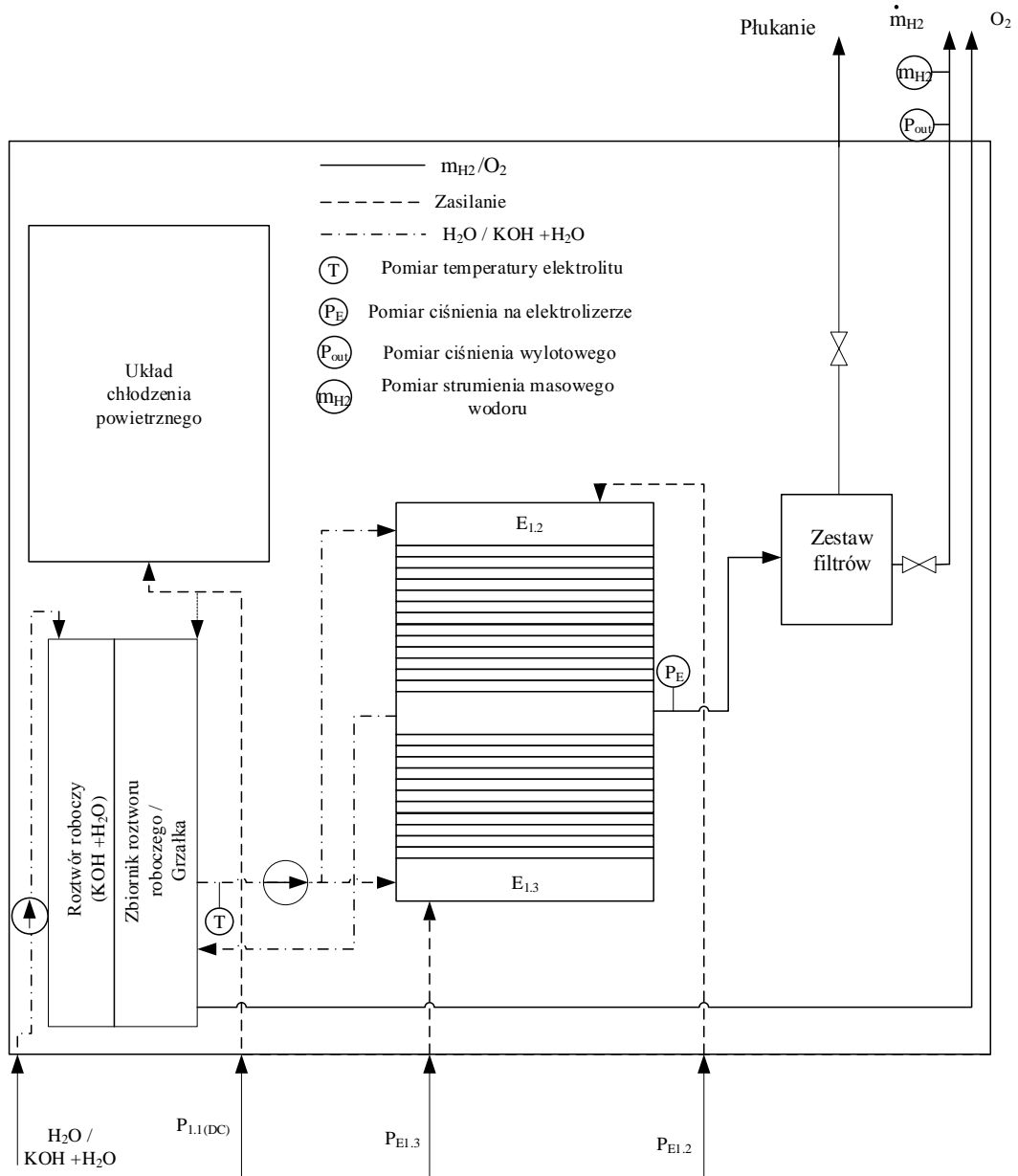
Obiektem badań i analiz był generator wodoru o wydajności $0,5 \text{ Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$ i maksymalnym ciśnieniu gazu na wylocie z instalacji wynoszącym $3,5 \text{ MPa}$. Generator ten wyposażony jest w dwa elektrolizery typu AEM, pracujące w środowisku alkalicznym.

6.1. Moduł zasilania

W skład modułu zasilania wchodzi trzy zasilacze: dwa z nich o mocy 1500 W każdy, odpowiedzialne za zasilanie poszczególnych elektrolizerów ($P_{1.2}$ i $P_{1.3}$) oraz trzeci zasilacz o mocy 1000 W ($P_{1.1}$) odpowiedzialny za zasilanie układu osuszania wodoru i układów pomocniczych w tym układu sterowania, układu pomiarowego i układu zabezpieczeń generatora. Moduł zasilający posiada również płytę główną wraz z integralnym systemem pomiarowym umożliwiającym pomiar: wartości natężeń prądów i spadków napięć poszczególnych elektrolizerów, ciśnienia wylotowego, ciśnienia panującego w stosie komórek elektrolitycznych (elektrolizerze) oraz pomiar wartości temperatury roztworu roboczego KOH.

6.2. Moduł elektrolizerów

Moduł elektrolizerów złożony jest z dwóch niezależnie zasilanych elektrolizerów typu AEM, oznaczonych jako $E_{1.2}$ oraz $E_{1.3}$. Oba elektrolizery posiadają wspólny kolektor wylotowy wodoru, a konstrukcja urządzenia umożliwia jedynie pomiar wartości sumarycznej wytworzonego gazu. Oprócz elektrolizerów w skład modułu wchodzi: zbiornik elektrolitu, chłodnica wraz z pompą obiegową elektrolitu, pompa uzupełniająca wodę dostarczaną do procesu elektrolizy oraz zestaw filtrów. Schemat modułu elektrolizerów zaprezentowano na Rys. 6.1.



Rys. 6.1 Moduł elektrolizerów

6.3. Moduł osuszania gazu

Zainstalowanie modułu osuszania, które jest opcjonalne, umożliwia uzyskanie wodoru o wysokiej czystości wynoszącej nawet 99,999% (V klasa czystości). Moduł osuszania składa się z dwóch naprzemiennie działających urządzeń osuszających zapewniających odpowiednią czystość wodoru poprzez absorpcję znajdującej się w gazie wody.

7. Charakterystyki badanych urządzeń

7.1. Stanowisko pomiarowe i mierzone parametry

Głównym elementem zbudowanego układu pomiarowego jest ośmiokanałowa karta pomiarowa. Urządzenie to po zaprogramowaniu umożliwiało rejestrację danych pomiarowych w pamięci komputera. Rejestracji podlegały następujące wielkości:

- natężenia prądów zasilania elektrolizerów $E_{1,2}$ i $E_{1,3}$,
- spadki napięć elektrolizerów $E_{1,2}$ i $E_{1,3}$,
- ciśnienie na stosie komórek elektrolitycznych,
- ciśnienie wylotowe wodoru,
- natężenie strumienia wytworzonego wodoru.

7.2. Charakterystyki elektrolizerów

Badaniom poddano dwa elektrolizery typu AEM wchodzące w skład generatora wodoru pracującego w środowisku alkalicznym. Moc elektrolizerów AEM wyznaczono jako sumę iloczynów prądów zasilania i spadków napięć na poszczególnych elektrolizerach $E_{1,2}$ i $E_{1,3}$ i przedstawiono równaniem (7.1).

$$P_E = P_{E_{1,2}} + P_{E_{1,3}} = I_{1,2} \cdot U_{1,2} + I_{1,3} \cdot U_{1,3} \quad (7.1)$$

gdzie:

$P_{E_{1,2}}$ moc dostarczona do elektrolizera $E_{1,2}$, W

$P_{E_{1,3}}$ moc dostarczona do elektrolizera $E_{1,3}$, W

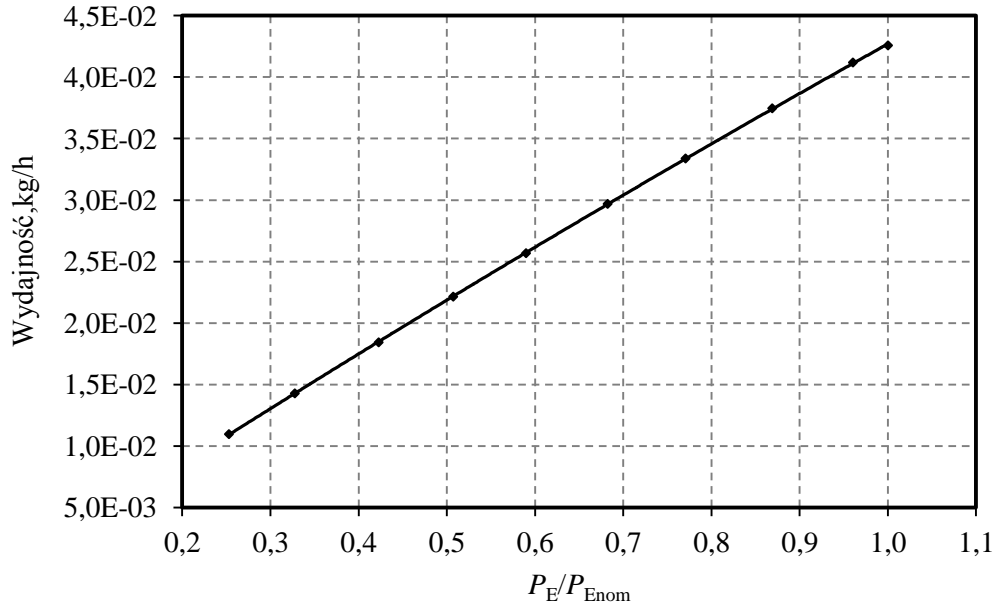
$I_{1,2}$ natężenie prądu elektrolizera $E_{1,2}$, A

$U_{1,2}$ spadek napięcia na elektrolizerze $E_{1,2}$, V

$I_{1,3}$ natężenie prądu elektrolizera $E_{1,3}$, A

$U_{1,3}$ spadek napięcia na elektrolizerze $E_{1,3}$, V

Na Rys. 7.1 przedstawiono zmierzoną charakterystykę sumarycznej wydajności dwóch badanych elektrolizerów typu AEM w zależności od mocy względnej układu ($P_E/P_{E_{nom}}$). Za wartość mocy nominalnej elektrolizerów ($P_{E_{nom}}$) przyjęto moc urządzenia dla maksymalnych prądów zasilania (maksymalnej wydajności) wynoszących odpowiednio 30,67 A dla elektrolizera $E_{1,2}$ oraz 31,82 A dla elektrolizera $E_{1,3}$, którym odpowiadały spadki napięć $U_{1,2} = 34,86$ V oraz $U_{1,3} = 34,88$ V.



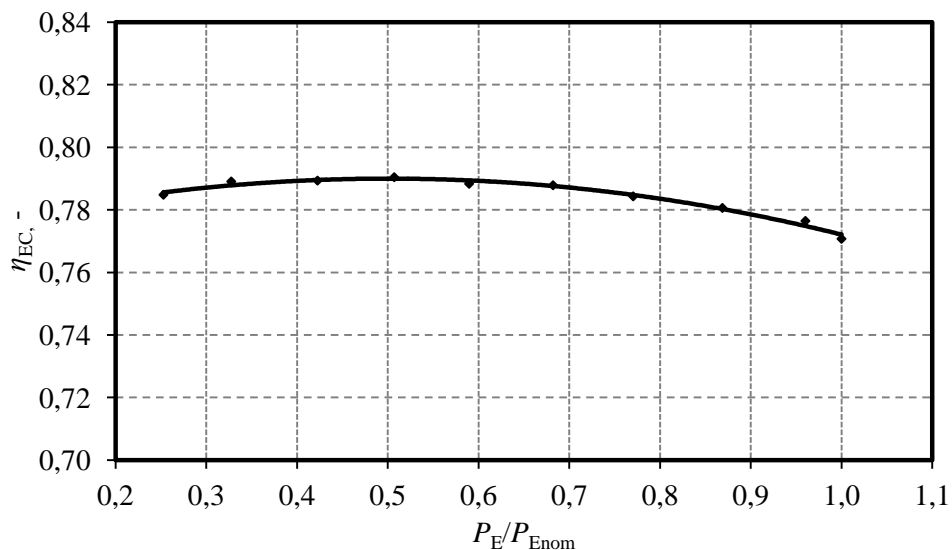
Rys. 7.1 Zależność wydajności układu elektrolizerów w funkcji ich mocy względnej

Sprawność elektrolizerów AEM zdefiniowano zgodnie z równaniem (7.2). Zależność sprawności elektrolizerów w funkcji ich względnej mocy czynnej wyznaczoną na podstawie pomiarów zaprezentowano na Rys. 7.2.

$$\eta_{EC} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{P_E} \quad (7.2)$$

gdzie:

- η_{EC} sprawność elektrolizerów, -
- P_E moc dostarczona do elektrolizerów, W
- HHV_{H_2} ciepło spalania wodoru 142, MJ/kg
- \dot{m}_{H_2} strumień masowy wytworzonego wodoru, kg/s



Rys. 7.2 Charakterystyka sprawności elektrolizerów w funkcji ich mocy względnej

Przebieg charakterystyk sprawności wyznaczonych na bazie eksperymentu pokrywa się (dla przetestowanego zakresu mocy urządzenia) z rozważeniami teoretycznymi [13].

Energochłonność elektrolizerów zdefiniowano zgodnie z równaniem (7.3), a charakterystykę energochłonności w względnej mocy czynnej elektrolizerów zaprezentowano na Rys. 7.3.

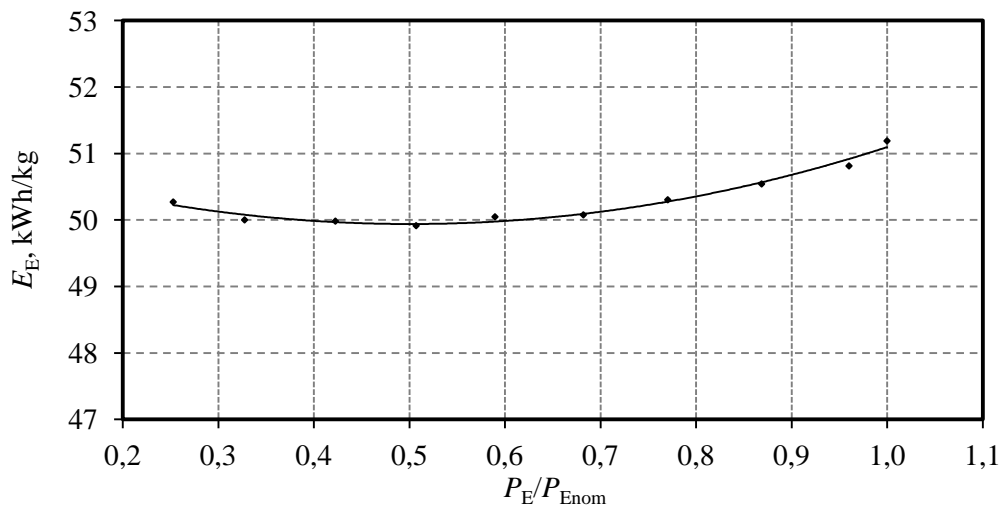
$$E_E = \frac{P_E}{\dot{m}_{H_2}} \quad (7.3)$$

gdzie:

E_E energochłonność elektrolizerów, kWh/kg

P_E moc dostarczona do elektrolizerów, kW

\dot{m}_{H_2} strumień wytworzonego wodoru, kg/h



Rys. 7.3 Charakterystyka energochłonności elektrolizerów w funkcji ich mocy względnej

Najwyższą energochłonność wynoszącą 51,2 kWh/kg elektrolizery wykazują dla najwyższej wartości mocy przy największej wydajności urządzeń. Najniższą wartość energochłonności uzyskano dla stosunku $P_E/P_{E_{nom}}$ wynoszącego 0,51.

7.3. Wyznaczenie charakterystyk przetwornic AC/DC

W skład instalacji generatora wodoru wchodzi wiele urządzeń pomocniczych. Do urządzeń pomocniczych należą między innymi zasilacze znajdujące się w module zasilającym generatora. Generator wodoru zasilany jest z sieci prądu przemiennego, a elektrolizery wymagają zasilania prądem stałym, dlatego też zasilacze pełnią rolę prostownika. Proces przetwarzania AC/DC powoduje dodatkowe straty zależne od sprawności samego zasilacza. Podczas prowadzonych badań wyznaczono charakterystyki sprawności wykorzystywanych

w układzie zasilaczy. Moc zasilacza obliczono ze wzoru (7.4), natomiast jego sprawność z zależności (7.5).

$$P_{1.2(\text{DC})} = I_{\text{Zas}} \cdot U_{\text{Zas}} = I_{1.2} \cdot U_{1.2} = P_{E1.2} \quad (7.4)$$

gdzie:

$P_{1.2(\text{DC})}$ moc DC zasilacza na wyjściu; $P_{1.2(\text{DC})} = P_{E1.2}$, W

$I_{\text{Zas}1.2}$ natężenie prądu zasilacza $P_{1.2}$, A

$U_{\text{Zas}1.2}$ wartość napięcia zasilacza $P_{1.2}$, V

$$\eta_{P1.2(\text{AC/DC})} = \frac{P_{1.2(\text{DC})}}{P_{1.2(\text{AC})}} \quad (7.5)$$

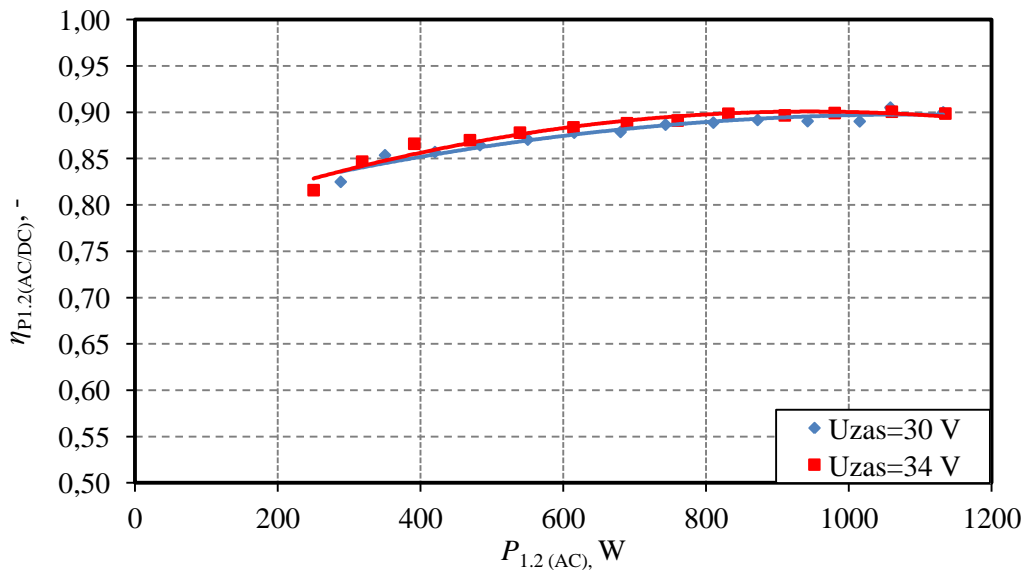
gdzie:

$\eta_{P1.2(\text{AC/DC})}$ sprawność zasilacza $P1.2$, -

$P_{1.2(\text{DC})}$ moc DC zasilacza, W

$P_{1.2(\text{AC})}$ moc AC dostarczona do zasilacza, W

Wyznaczono charakterystyki sprawności testowanego zasilacza dla dwóch wartości napięć zasilania U_{Zas} (30 V i 34 V), przy zmiennej wartości natężenia prądu zasilającego I_{Zas} w przedziale od 5 A do 30 A przedstawia Rys. 7.4.



Rys. 7.4 Charakterystyka sprawności zasilacza $P_{1.2}$ w funkcji mocy $P_{1.2(\text{AC})}$ dla dwóch wartości napięć U_{Zas} 30 V i 34 V

Z przedstawionych charakterystyk zasilacza $P_{1.2}$ wynika, że wraz ze wzrostem mocy urządzenia wzrasta również jego sprawność, która dla największych przebadanych mocy przekracza 90%.

8. Charakterystyki generatora wodoru

Ogólną zależność na sprawność generatora wodoru przedstawia równanie (8.1).

$$\eta_G = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{P_{(AC)}} \quad (8.1)$$

gdzie:

η_G sprawność generatora wodoru, -

$P_{(AC)}$ moc dostarczona do generatora wodoru, W

HHV_{H_2} ciepło spalania wodoru 142, MJ/kg

\dot{m}_{H_2} strumień masowy wytworzonego wodoru, kg/s

Moc $P_{(AC)}$ jest sumą mocy dostarczonej do elektrolizerów, mocy urządzeń pomocniczych P_W przy uwzględnieniu sprawności przetwornic AC/DC. Wielkość $P_{(AC)}$ wyrażono równaniem (8.2).

$$P_{(AC)} = P_E + P_W + \Delta P_{(AC/DC)} \quad (8.2)$$

gdzie:

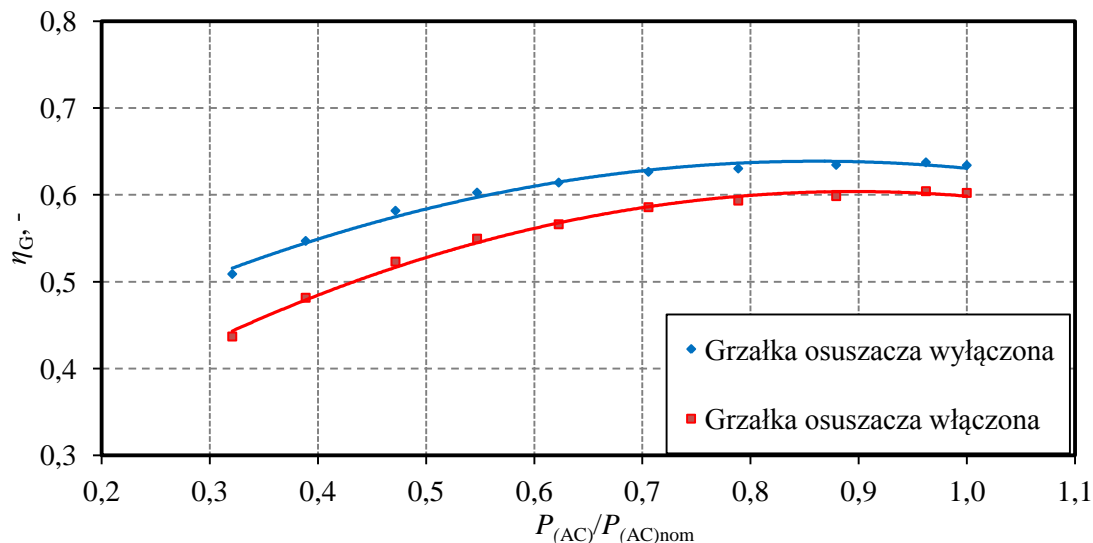
$P_{(AC)}$ moc dostarczona do generatora wodoru, W

P_E moc dostarczona do układu elektrolizerów, W

P_W moc urządzeń pomocniczych, W

$\Delta P_{(AC/DC)}$ straty przetwarzania AC/DC

Przebieg charakterystyk sprawności generatora wodoru w funkcji mocy względnej generatora wodoru przedstawiono na Rys. 8.1.



Rys. 8.1 Charakterystyka sprawności generatora wodoru w funkcji jego mocy względnej

Najwyższą sprawność generatora wodoru, wynoszącą około 60% uzyskano w znamionowym punkcie pracy urządzenia. Wraz ze spadkiem wartości mocy dostarczonej do zasilania układu maleje również wartość sprawności generatora wodoru.

Dla generatora wodoru analogicznie jak w przypadku elektrolizerów można wyznaczyć parametr związany z energochłonnością. w tym celu wykorzystano równanie (8.3). Charakterystykę zmiany energochłonności w funkcji mocy względnej generatora wodoru przedstawiono na Rys. 8.2.

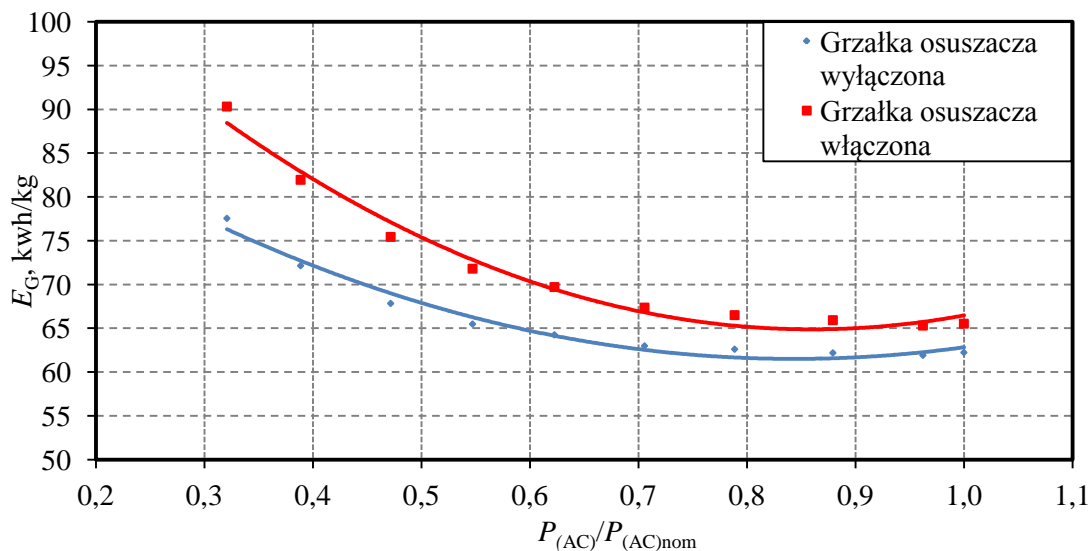
$$E_G = \frac{P_{(AC)}}{\dot{m}_{H_2}} \quad (8.3)$$

gdzie:

E_G energochłonność generatora wodoru, kWh/kg

$P_{(AC)}$ moc dostarczona do generatora wodoru, W

\dot{m}_{H_2} strumień masowy wytworzonego wodoru, kg/h

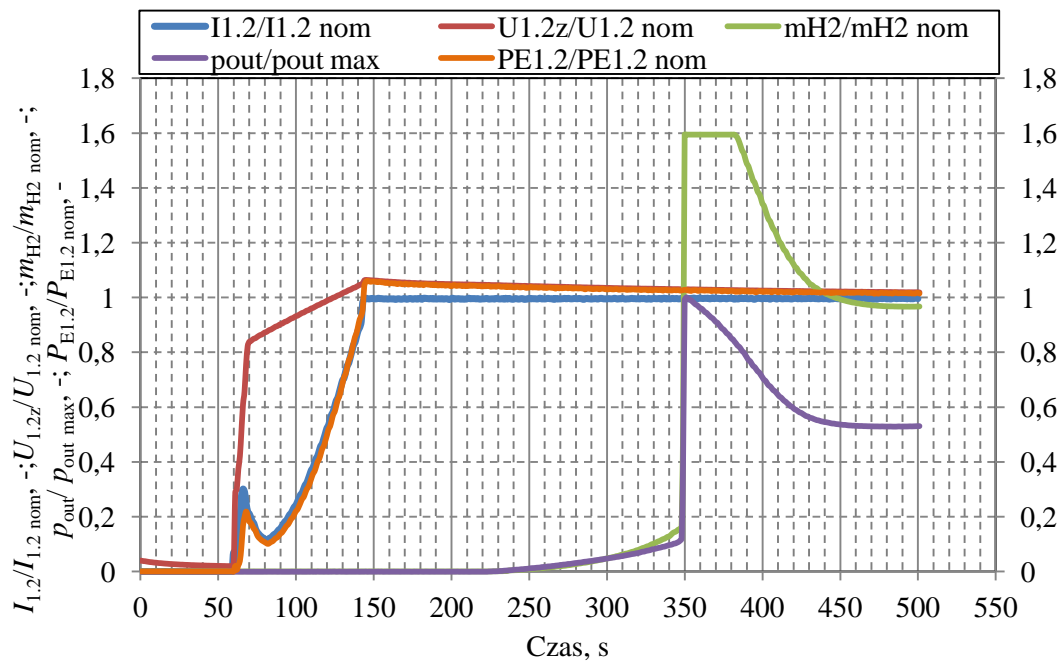


Rys. 8.2 Charakterystyka energochłonności generatora wodoru w funkcji jego mocy względnej

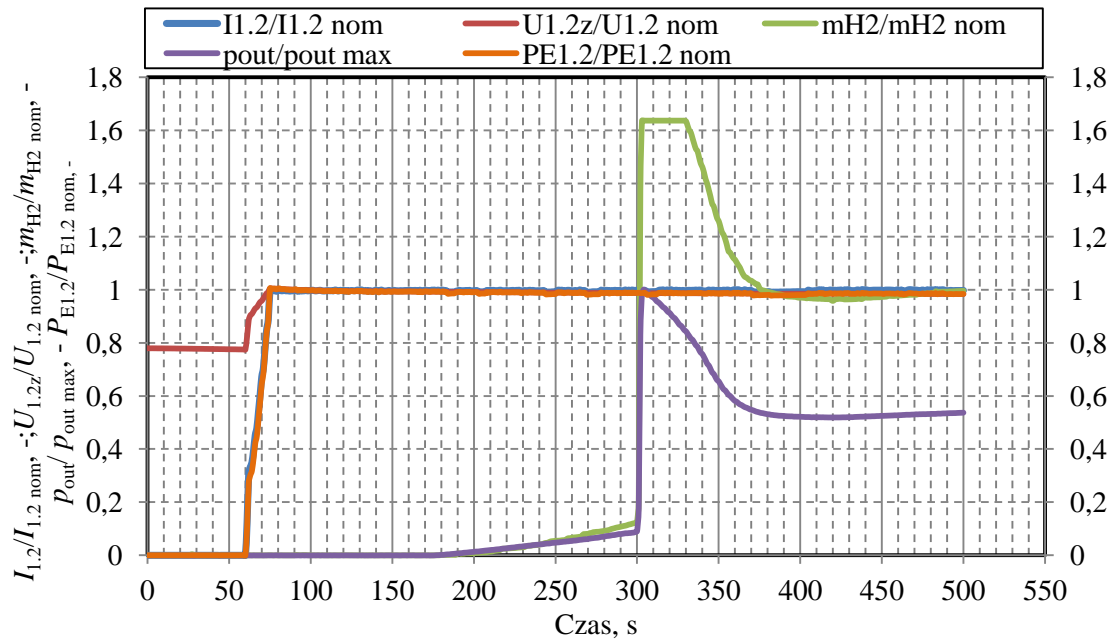
Największą energochłonność w zakresie od 77 kWh/kg do około 90 kWh/kg uzyskano przy najmniejszej produkcji wodoru (najmniejszej mocy). Najmniejszą energochłonność (62 kWh/kg - 65 kWh/kg) uzyskano dla około 95% maksymalnej mocy generatora wodoru ($0,95 P_{(AC)nom}$).

9. Rozruch urządzenia

Generator poddano badaniom w czasie rozruchu w stanie "zimnym" oraz w stanie "ciepłym". Stan zimny oznacza uruchomienie urządzenia, gdy temperatura elektrolitu wynosiła około 20°C. Rozruch ze stanu "ciepłego" dotyczy uruchomienia urządzenia po jego wcześniejszej pracy, przy temperaturze elektrolitu wynoszącej 40°C. Otrzymane wyniki dla elektrolizera $E_{1.2}$ dla stanu zimnego przedstawiono w funkcji czasu na Rys. 9.1, z kolei wyniki dla stanu ciepłego przedstawiono w funkcji czasu na Rys. 9.2.



Rys. 9.1 Zmiana parametrów elektrolizera $E_{1.2}$ przy włączeniu urządzenia w stanie zimnym

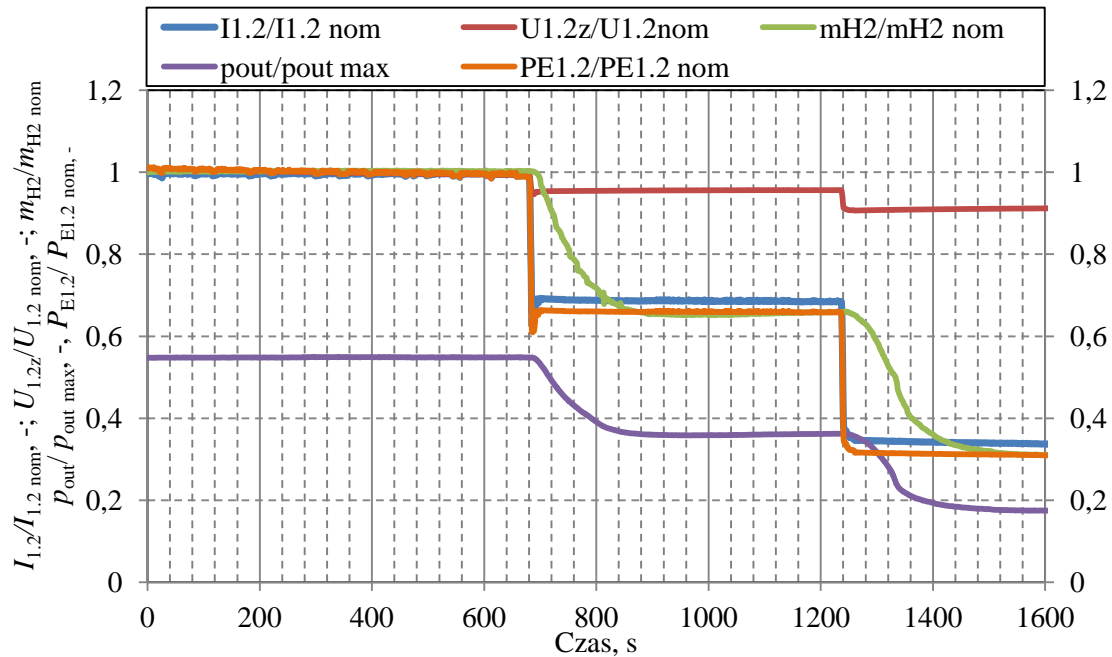


Rys. 9.2 Zmiana parametrów elektrolizera $E_{1.2}$ przy włączeniu urządzenia w stanie ciepłym

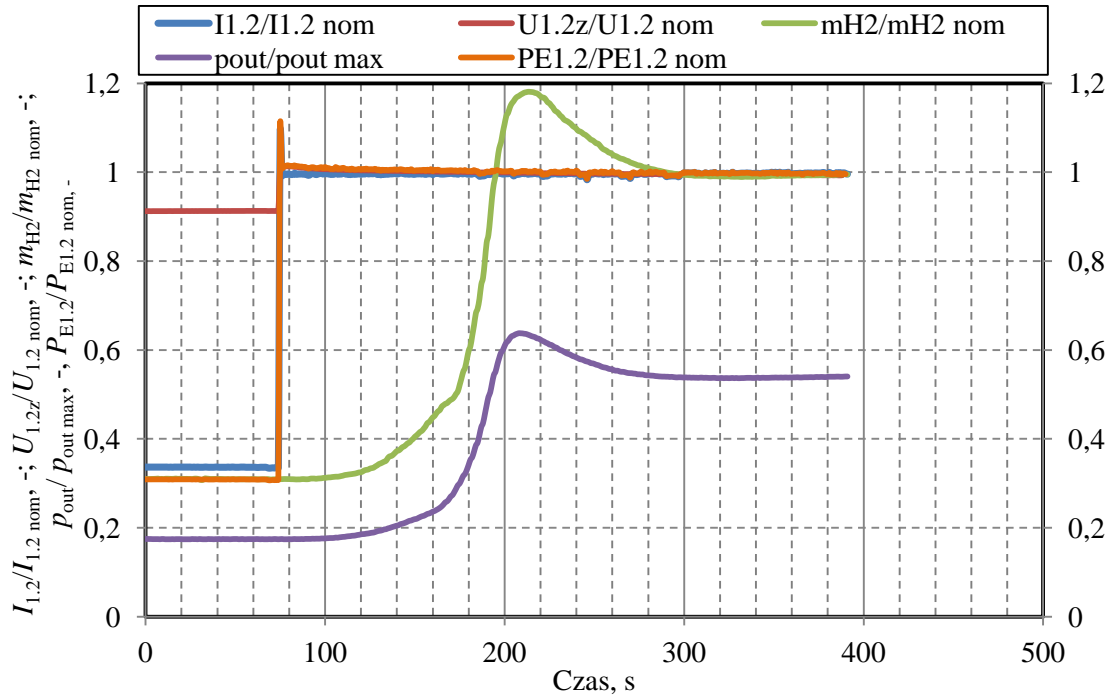
10.Reakcja urządzenia na zmianę parametrów zasilania

Instalacje przeznaczone do magazynowania energii w systemach elektroenergetycznych, w tym również układy P2G oraz P2G2P, powinny być dostosowane do pracy przy różnych parametrach zasilania. Wiąże się to z faktem, iż zazwyczaj zachodzi potrzeba integracji takich instalacji z układami OZE charakteryzującymi się zmienną ilością wytwarzanej energii elektrycznej w zależności m.in. od panujących w danej chwili warunków atmosferycznych.

W celu sprawdzenia reakcji badanych elektrolizerów na gwałtowne zmiany parametrów zasilania urządzenia te poddano skokowym zmianom wartości natężenia prądów zasilających. W badaniach symulowano skokowy wzrost oraz spadek wartości natężenia prądów zasilających elektrolizery AEM. Otrzymane charakterystyki przedstawiające reakcję na skokową zmianę parametrów zasilania elektrolizera $E_{1,2}$ zaprezentowano kolejno na Rys. 10.1 oraz Rys. 10.2.



Rys. 10.1 Zmiana parametrów elektrolizera $E_{1,2}$ w funkcji czasu przy nagłym spadku wartości natężenia prądu zasilającego



Rys. 10.2 Zmiana parametrów elektrolizera $E_{1.2}$ w funkcji czasu przy nagłym wzroście natężenia prądu zasilającego

11. Analiza niepewności pomiaru

11.1. Metodologia wykonanych obliczeń

Celem wykonywanych pomiarów jest określenie wartości wielkości mierzonych. Wynik pomiaru jest jedynie estymatą lub przybliżeniem wartości wielkości mierzonej. Dlatego też wynik badań jest kompletny dopiero wtedy, gdy podany jest wraz z niepewnością tej estymaty [14-18].

11.2. Wyznaczenie niepewności standardowej typu A

Dla odpowiednio licznej serii pomiarowej mierzonej wielkości, w której liczba pomiarów $n > 30$, można oszacować wartość odchylenia standardowego eksperymentalnego korzystając z zależności [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{sr})^2}{n-1}} \quad (11.1)$$

gdzie:

- n liczba pomiarów,
- x_i i-ta wartość zmierzona,
- x_{sr} wartość średnia,

Niepewność standardową pomiaru wyznaczoną na podstawie równania (11.1) można następnie wykorzystać przy oszacowaniu niepewności pomiaru danej wielkości wykonywanych w takich samych warunkach. Jednak średnia arytmetyczna z serii pomiarów jednakowo dokładnych x_{sr} także jest zmienną losową, gdyż powtarzając wielokrotnie serię pomiarów dla analizowanej wielkości przy niezmiennych warunkach, otrzymana zostanie każdorazowo inna wartość średniej x_{sr} . W takim przypadku można wykorzystać równanie (11.2) określające wielkość odchylenia standardowego wartości średniej.

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{sr})^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (11.2)$$

11.3. Wyznaczenie niepewności standardowej typu B, niepewności całkowitej oraz niepewności standardowej złożonej

Dla estymaty wielkości mierzonej dla której nie występuje możliwość wyznaczenia, w powtarzanych seriach pomiarowych, jej niepewność standardową można wyznaczyć na drodze analizy naukowej opartej na wszystkich dostępnych informacjach o możliwościach zmiany wielkości mierzonej. Oszacowane w ten sposób wartości niepewności pomiaru są nazywane niepewnością standardową typu B.

Niepewność typu B pomiaru strumienia masy wyprodukowanego wodoru obliczono jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności użytego przepływomierza oraz niepewności pomiaru natężenia przepływu dla karty pomiarowej.

$$\mu_{B_mH_2} = \sqrt{(\mu m_{cori})^2 + (\mu m_U)^2} \quad (11.3)$$

gdzie:

μm_{cori} niepewności przepływomierza, kg/s

μm_U niepewność pomiaru natężenia przepływu dla karty pomiarowej, kg/s

Niepewność typu B pomiaru napięcia (z wykorzystaniem dzielnika napięcia) można wyrazić równaniem:

$$\mu_{B_UWE} = \sqrt{\left(\frac{\partial U_{WY}}{\partial U_{WE}}\right)^2 \cdot (\mu U_{WY})^2 + \left(\frac{\partial U_{WY}}{\partial R_1}\right)^2 \cdot (\mu R_1)^2 + \left(\frac{\partial U_{WY}}{\partial R_2}\right)^2 \cdot (\mu R_2)^2} \quad (11.4)$$

gdzie:

μU_{WY} niepewność pomiaru napięcia dla karty pomiarowej, V

μR_1 niepewność rezystancji R_1 dzielnika napięć, Ω

μR_2 niepewność rezystancji R_2 dzielnika napięć, Ω

Niepewność pomiaru natężenia prądu (z wykorzystaniem bocznika) ogólnie dla każdego z elektrolizerów można wyrazić równaniem:

$$\mu_{B_I} = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial U_b}\right)^2 \cdot (\mu U_b)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R_b}\right)^2 \cdot (\mu R_b)^2} \quad (11.5)$$

gdzie:

μU_b niepewność pomiaru natężenia prądu dla karty pomiarowej, V

μR_b niepewność rezystancji bocznika, Ω

Niepewność całkowitą obliczono posługując się równaniem (11.6). Otrzymane wyniki obliczeń przedstawiono w Tabeli 11.1

$$\mu = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (11.6)$$

gdzie:

- μ niepewność całkowita,
- μ_A niepewność standardowa typu A,
- μ_B niepewność standardowa typu B,

Tabela 11.1 Maksymalne wartości niepewności całkowitej dla mierzonych wielkości

Wielkość fizyczna	Jednostka	Maksymalna niepewność całkowita
Natężenie prądu	A	0,095
Spadek napięcia	V	0,182
Strumień wodoru	kg/h	0,0002
Opór elektryczny	Ω	0,024
Moc elektrolizera $E_{1,2}$	W	6,43
Moc elektrolizera $E_{1,3}$	W	6,57
Moc elektrolizerów	W	9,26
Ciśnienie	bar	0,069
Sprawność elektrolizerów	-	0,017

Niepewność standardową złożoną μ_c , można obliczyć wykorzystując prawo propagacji niepewności oraz przedstawić równaniem (11.7) [14,15].

$$\mu_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \mu^2(X_i)} \quad (11.7)$$

11.4. Wyznaczenie niepewności rozszerzonej

Niepewność rozszerzoną obliczono posługując się równaniem (11.8) [15].

$$U_R = k \cdot \mu \quad (11.8)$$

gdzie:

- U_R niepewność rozszerzona,
- k współczynnik rozszerzenia

W obliczeniach przyjęto wartość współczynnika rozszerzenia $k=3$, co przy założeniu, że niepewność całkowita μ wraz z badanymi wielkościami charakteryzuje się normalnym rozkładem prawdopodobieństwa oraz przy dużej liczbie stopni swobody, odpowiada przedziałowi ufności w przybliżeniu równemu 99% [15].

12. Wyznaczenie granicznej ceny sprzedaży wodoru

Celem analizy ekonomicznej wykonanej dla instalacji generatorów wodoru było wyznaczenie granicznej ceny sprzedaży wodoru, wytworzonego w procesie elektrolizy. W obliczeniach wykorzystano wskaźnik *NPV* (ang. *Net Present value*), który wyrażono zależnością [19-22]:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t=N} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (12.1)$$

gdzie:

CF_t przepływy gotówkowe w danym okresie czasu t ,

r stopa dyskonta, (6%)

t kolejne lata funkcjonowania instalacji

N żywotność instalacji generatorów wodoru, $t = 15$ lat

Przepływy gotówkowe CF_t wyznaczono zgodnie z równaniem

$$CF_t = -J + S_{H_2} - S_{EN} - K_{OP} \quad (12.2)$$

gdzie:

J koszty inwestycyjne instalacji, zł

S_{H_2} przychód ze sprzedaży wodoru, zł

S_{EN} koszt zakupu energii elektrycznej zasilającej generator wodoru, zł

K_{OP} koszty operacyjne (eksploatacji, obsługi, wykonanych napraw i konserwacji), zł

W skład kosztów inwestycyjnych wchodził jedynie zakup generatora wodoru, stąd też koszty inwestycyjne J można zapisać jako:

$$J = J_G = k_G \cdot P_G \quad (12.3)$$

gdzie:

J_G koszty inwestycyjne generatorów wodoru, zł

k_G koszt jednostkowy zakupu generatorów wodoru, zł/kW

P_G moc generatora wodoru, kW

Do wyznaczenia granicznej ceny sprzedaży energii wykorzystano warunek $NPV = 0$, wówczas zależność (12.1) przy założeniu stałych składników kosztów i przychodów oraz założeniu, że nakłady inwestycyjne poniesiono w ciągu roku zerowego ($t=0$), przyjmuje postać [23]:

$$NPV = \frac{S_{H_2} - S_{EN} - J\rho - K_{OP}}{\rho} = 0 \quad (12.4)$$

Przy czym ρ określone jest jako roczna stopa zwrotu nakładów inwestycyjnych [23]:

$$\rho = \frac{r \cdot (1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \quad (12.5)$$

Wartość rocznej stopy zwrotu nakładów inwestycyjnych przy przyjętych założeniach $r = 0,06$ oraz $N = 15$ jest równa 0,1030.

Wykorzystując warunek $NPV = 0$ (12.4) można zapisać:

$$S_{H_2} = S_{EN} + J\rho + K_{OP} \quad (12.6)$$

oraz

$$c_{sH_2} \cdot E_{H_2} = c_{kEN} \cdot E_G + \rho \cdot (k_G \cdot P_G) + K_{OP} \quad (12.7)$$

gdzie:

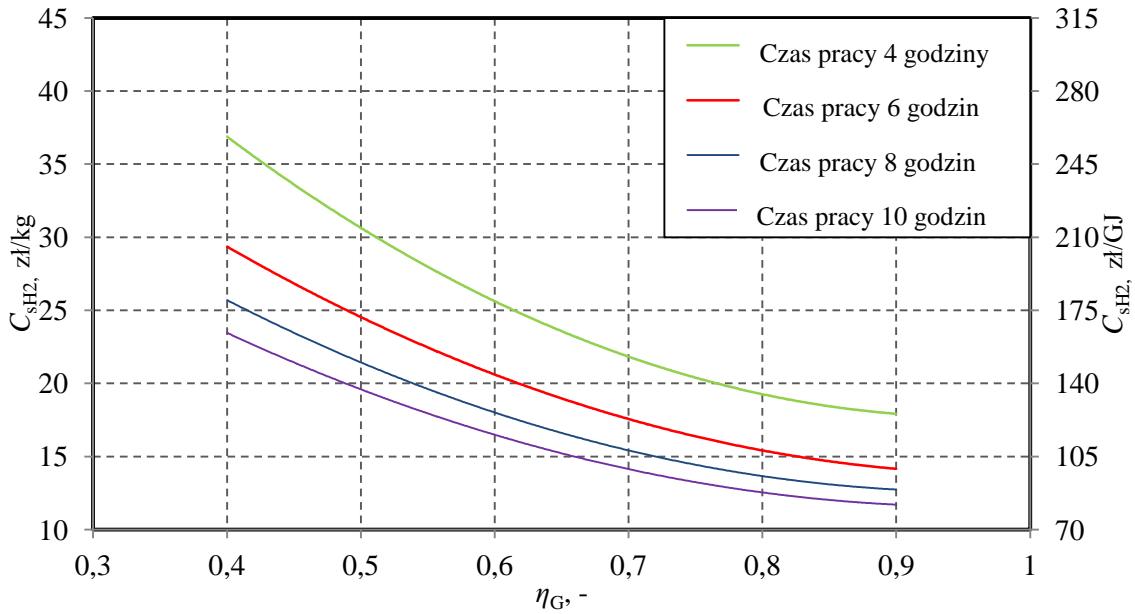
P_G - moc instalacji generatorów wodoru, kW

Obliczenia ekonomiczne wykonano dla następujących przypadków:

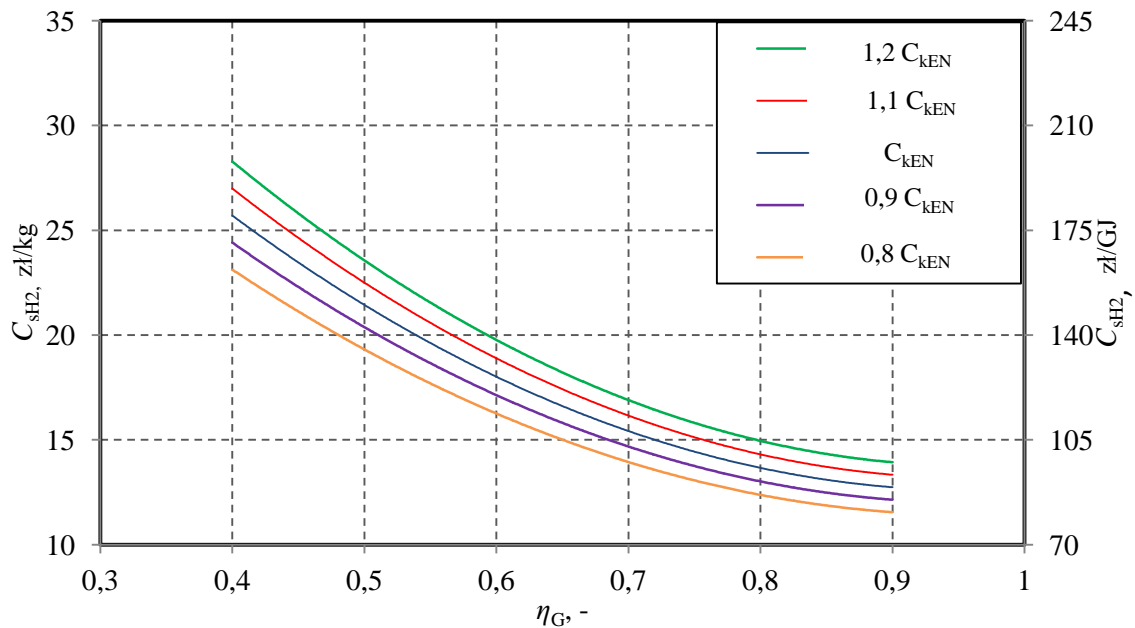
- Zakładając koszty operacyjne instalacji $K_{OP} = 0$ oraz darmową energię elektryczną dostarczaną do instalacji generatorów wodoru,
- Zakładając koszty operacyjne instalacji $K_{OP} = 0$,
- Przy uwzględnieniu kosztów operacyjnych K_{OP} w których skład wchodził koszt zakupu wody demineralizowanej, wynagrodzenie pracowników oraz koszty okresowych przeglądów i napraw.

Na Rys. 12.1 - Rys. 12.3 przedstawiono wpływ czasu pracy instalacji, ceny zakupu energii elektrycznej oraz ceny jednostkowej zakupu instalacji generatora wodoru na graniczną cenę sprzedaży wytworzonego wodoru dla przypadku uwzględniającego zakup energii elektrycznej oraz koszty operacyjne instalacji. Graniczną cenę sprzedaży wodoru dla analizowanego przypadku przedstawia zależność:

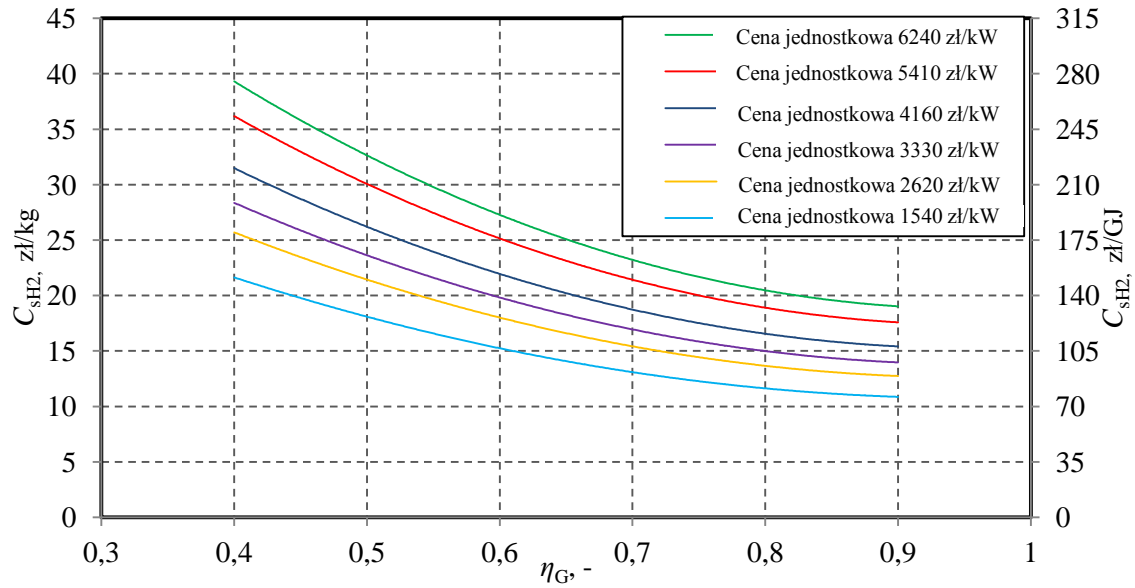
$$c_{sH_2} = c_{kEN} \cdot \frac{1}{\eta_G} + \rho \cdot \frac{1}{\eta_G} \cdot \frac{k_G}{\tau_G} + \frac{K_{OP}}{P_G \cdot \tau_G} \cdot \frac{1}{\eta_G} \quad (12.8)$$



Rys. 12.1 Wpływ czasu pracy instalacji generatorów H_2 w ciągu doby na graniczną cenę sprzedaży wytworzonego wodoru w funkcji sprawności generatorów wodoru przy uwzględnieniu kosztów operacyjnych układu (dla $k_G = 630 \text{ €/kW}$ ($\sim 2620 \text{ zł/kW}$), $P_G = 10 \text{ MW}$ oraz $c_{KEN} = 0,133 \text{ zł/kWh}$)



Rys. 12.2 Wpływ ceny zakupu energii elektrycznej zasilającej generator H_2 na graniczną cenę sprzedaży wytworzonego wodoru w funkcji sprawności generatorów wodoru przy uwzględnieniu kosztów operacyjnych układu (dla $k_G = 630 \text{ €/kW}$ ($\sim 2620 \text{ zł/kW}$), $P_G = 10 \text{ MW}$ oraz $\tau_G = 2920 \text{ godzin}$ (8 godzin dziennie))



Rys. 12.3 Wpływ ceny jednostkowej zakupu instalacji generatora H_2 na graniczną cenę sprzedaży wytworzonego wodoru w funkcji sprawności generatorów wodoru przy uwzględnieniu kosztów operacyjnych układu (dla $c_{KEN} = 0,133 \text{ zł/kWh}$, $P_G = 10 \text{ MW}$ oraz $\tau_G = 2920$ godzin rocznie (8 godzin dziennie))

Dla pierwszego analizowanego przypadku ($K_{OP} = 0$ oraz $c_{KEN} = 0$) dla instalacji referencyjnej o parametrach $k_G = 630 \text{ €/kW}$ ($\sim 2620 \text{ zł/kW}$), $\tau_G = 2920$ godzin rocznie (8 godzin dziennie), $P_G = 10 \text{ MW}$ oraz $\eta_G = 80\%$ wartość granicznej ceny sprzedaży wytworzonego wodoru wyniosła $4,56 \text{ zł/kg}$ ($1,10 \text{ Euro/kg}$). Dla kolejnego analizowanego przypadku ($K_{OP} = 0$) oraz uwzględnionych kosztach zakupu energii elektrycznej c_{KEN} wartość granicznej ceny sprzedaży wytworzonego wodoru dla instalacji referencyjnej wyniosła $11,10 \text{ zł/kg}$ ($2,67 \text{ Euro/kg}$). W przypadku wariantu uwzględniającego koszty operacyjne instalacji wraz z kosztem zakupu energii elektrycznej c_{KEN} wartość granicznej ceny sprzedaży wodoru wyniosła $13,84 \text{ zł/kg}$ ($3,33 \text{ Euro/kg}$).

13. Wnioski szczegółowe

- Sprawność badanych elektrolizerów w przedziale mocy (od 25% do 100% przyjmuje wartości od 77% do 79%). Najniższą wartość sprawności uzyskano dla najwyższej wartości natężeń prądów zasilających.
- Najniższa uzyskana energochłonność układu elektrolizerów wyniosła około 50 kWh/kg wodoru. Najwyższą energochłonność wynoszącą 51,2 kWh/kg wodoru badane elektrolizery AEM osiągają dla nominalnej wartości mocy zasilającej elektrolizery (P_{Enom}) - 2180 W.
- Najwyższą sprawność generatora wodoru, wynoszącą około 60% uzyskano w znamionowym punkcie pracy urządzenia (sprawność elektrolizerów w tym punkcie wynosiła). Wraz ze spadkiem wartości mocy dostarczanej do zasilania układu maleje również wartość sprawności generatora wodoru. Największą energochłonność badany generator wodoru uzyskuje przy najmniejszej produkcji wodoru (najmniejszej wartości mocy zasilającej), natomiast najmniejszą energochłonność generator wodoru uzyskuje w trakcie pracy przy nominalnej wartości mocy zasilającej (największej wydajności).
- Proces stabilnej pracy instalacji rozpoczyna się po upływie 450 s od startu zimnego urządzenia (temperatura elektrolitu $\sim 20^{\circ}\text{C}$) oraz po upływie około 400 s od startu ciepłego, przy temperaturze elektrolitu wynoszącej około 40°C .
- W trakcie dochodzenia instalacji do stanu ustalonego następuje (po uruchomieniu ze stanu „zimnego”) zmiana sprawności badanych elektrolizerów AEM z 74,3% do 77,8%. Przyczyną zmiany wartości sprawności elektrolizerów jest zmiana wartości temperatury elektrolitu, powodując zmiany rezystancji badanych elektrolizerów.
- Dla otrzymanych eksperymentalnie wyników pomiarów wyznaczono niepewności pomiaru typu A, typu B, złożone, całkowite oraz rozszerzone (przy współczynniku rozszerzenia $k=3$).
- Wykonano analizę ekonomiczną instalacji generatorów wodoru za układ referencyjny przyjmując instalację o parametrach: jednostkowy koszt inwestycyjny $k_G = 630 \text{ €/kW}$ ($\sim 2620 \text{ zł/kW}$), czas pracy instalacji $\tau_G = 2920$ godzin rocznie (8 godzin dziennie), moc instalacji $P_G = 10 \text{ MW}$, sprawność instalacji generatorów wodoru $\eta_G = 80\%$ oraz żywotności wynoszącej 100 000 h.
- Pierwszym analizowanym przypadkiem była instalacja w której założono koszty operacyjne $K_{OP} = 0$ oraz darmową energię elektryczną $c_{KEN} = 0$. Dla takich założeń przy

zachowaniu warunku $NPV = 0$ graniczna cena sprzedaży wodoru dla układu referencyjnego wyniosła 4,56 zł/kg (1,10 Euro/kg), co odpowiada 32,09 zł/GJ.

- Dla wariantu $K_{OP} = 0$ uwzględniającego cenę zakupu energii elektrycznej c_{KEN} wartość granicznej ceny sprzedaży wodoru dla instalacji referencyjnej wyniosła 11,10 zł/kg (2,67 Euro/kg), co odpowiada 78,16 zł/GJ.
- W przypadku wariantu uwzględniającego koszty operacyjne instalacji referencyjnej oraz koszt zakupu energii elektrycznej, dla warunku $NPV = 0$ wartość granicznej ceny sprzedaży wodoru wyniosła 13,84 zł/kg (3,33 Euro/kg), co odpowiada 97,47 zł/GJ
- Moc instalacji ma istotny wpływ na jednostkowy koszt zakupu generatorów. W zakresie mocy od 1 do 200 MW wartość jednostkowego kosztu zakupu zmienia się od wartości 4146 zł/kW (~997 €/kW) do 1437 zł/kW (~345 €/kW).
- Dla przyjętej wartości sprawności układu referencyjnego η_G wynoszącej 80% wyznaczona graniczna cenę sprzedaży wodoru dla instalacji o mocy 2 MW wynosi 18,25 zł/kg (128,57zł/GJ), natomiast dla instalacji o mocy 100 MW 11,55 zł/kg, co odpowiada 81,32 zł/GJ.

14. Uwagi końcowe

- W pracy opracowano metodologię wyznaczania charakterystyk sprawności generatora wodoru i badanych elektrolizerów oraz wskaźnika potrzeb własnych. Wielkości te wyznaczono w funkcji mocy względnej elektrolizerów oraz mocy względnej generatora wodoru. Takie podejście nie było dotychczas w literaturze przedmiotu wyczerpująco przedstawione.
- Duże zainteresowanie nowymi technologiami magazynowania energii obserwowane jest głównie w tych regionach, w których występuje dynamiczny przyrost mocy zainstalowanej w ramach systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE). Odnawialne źródła energii, takie jak farmy wiatrowe czy też instalacje fotowoltaiczne charakteryzują się zmienną ilością energii elektrycznej dostarczanej do sieci, zależną od warunków pogodowych i przeważnie niedostosowaną do bieżących potrzeb systemu energetycznego. Rolą instalacji magazynowania energii ma być stabilizacja systemów elektroenergetycznych. Wykorzystanie nowych technologii pozwalających na dynamiczny rozwój instalacji magazynowania energii zapewni pełne wykorzystanie potencjału energetycznego odnawialnych źródeł energii przy zagwarantowaniu efektywnego funkcjonowania układów scentralizowanych energetyki konwencjonalnej.
- Obecnie obserwowany jest znaczny wzrost popularności instalacji wytwarzania wodoru poprzez proces elektrolizy wody. Instalacje Power to Gas lub Power to Gas to Power mogą w przyszłości stanowić alternatywę dla obecnie stosowanych instalacji magazynowania energii. Wodór w instalacjach P2G oraz P2G2P wytwarzany jest w procesie elektrolizy wody, wykorzystując do tego energię pochodzącą z odnawialnych źródeł. Poznanie fundamentalnych zasad działania generatorów wodoru oraz ich reakcji na skokowe zmiany wartości prądu zasilającego jest kluczowe dla poprawnego projektowania instalacji Power to Gas oraz Power to Gas to Power. Istotne w tym przypadku jest prowadzenie badań obejmujących określenie sprawności generatorów wodoru przy zmianach wartości prądu zasilającego, ponieważ prezentowane w literaturze wyniki skupiają się głównie na charakterystykach samych elektrolizerów pracujących w warunkach znamionowych. Pomijane jest wtedy zapotrzebowanie na energię elektryczną związane z urządzeniami pomocniczymi, takimi jak przetwornice, pompy, wentylatory czy też systemy sterowania. Zaprezentowane w rozprawie charakterystyki urządzeń mogą zostać wykorzystane do walidacji istniejących modeli matematycznych

analogicznych typów urządzeń oraz stanowić podwaliny dla projektowania instalacji typu P2G lub P2G2P. Zaprezentowane w pracy charakterystyki zostały wykonane w pełnym zakresie pracy generatora wodoru wraz z jego stanami dynamicznymi i przejściowymi. Zbadanie urządzenia w całym zakresie jego działania oraz dla różnych stanów pracy umożliwia określenie sposobu zasilania generatora wodoru ze źródeł charakteryzujących się zmienną ilością wytwarzanej energii (np. OZE).

- Z przedstawionych w pracy charakterystyk generatora wodoru oraz elektrolizerów wynika, że tego typu instalacje nadają się do współpracy z np. farmami wiatrowymi. Zmiana wartości natężenia prądu zasilającego elektrolizery wpływa na wydajność generatora wodoru, który dostosowuje swoją pracę do aktualnej mocy zasilania. Powstałe przy zmianie wartości natężenia prądu zasilającego fluktuacje przepływu wodoru wynikają z wahań ciśnienia w modułach generatora. Szybka reakcja na skokowe zmiany natężenia prądu zasilającego możliwa jest tylko w przypadku pracy ciągłej instalacji generatora wodoru, ponieważ proces stabilnej pracy instalacji rozpoczyna się po upływie 450 s od startu ze stanu zimnego urządzenia oraz po upływie około 400 s od startu urządzenia ze stanu ciepłego.
- Pomimo dostrzegalnych wad strony ekonomicznej prezentowanej technologii prognozowany jest dalszy rozwój wykorzystywania instalacji generatorów wodoru. Umożliwić to może obniżenie cen elektrolizerów, dzięki wykorzystaniu nowych rozwiązań technologicznych oraz materiałowych, które wpłynęłyby jednocześnie na zwiększenie sprawności urządzeń jak i rozszerzenie oferty programów umożliwiających pozyskanie dodatkowych środków finansowych na rozwój oraz inwestycje związane z energetyką wodorową. Kolejną istotną sprawą jest znaczna obniżka cen sprzedaży energii elektrycznej, szczególnie w okresie jej nadmiarowej produkcji w systemach energetycznych charakteryzujących się dużym udziałem odnawialnych źródeł energii. Cena ta może nawet spadać do ujemnych wartości co oznacza, że producenci energii elektrycznej muszą w tym okresie dopłacać za jej odbieranie.

Literatura

- [1] Raport KSE. Dostęp Online: <http://www.pse.pl>.
- [2] Gawlik L., Szurlej A., Wyrwa A.: *The impact of the long-term EU target for renewables on the structure of electricity production in Poland*. Energy 92, 2015, str. 172-178.
- [3] Igliński B., Buczkowski R., Iglińska A., Cichosz M., Plaskacz - Dziuba M.: *SWOT analysis of the renewable energy sector in Poland. Case study of Wielkopolskie region*. Journal of Power Technologies 95 (2), 2015, str. 143-157.
- [4] Paska J., Surma T.: *Electricity generation from renewable energy sources in Poland*. Renewable Energy 71, 2014, str. 286-294.
- [5] Wyrwa A., Szurlej A., Gawlik L., Suwała W.: *Energy scenarios for Poland e a comparison of PRIMES and TIMES e PL modeling results*. Journal of Power Technologies 95 (5), 2015, str. 100-106.
- [6] Fuel Cell Technologies: *Market Report 2015*. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE/EE1485, August 2016.
- [7] Węcel D, Ogulewicz W., Kotowicz J., Jurczyk M.: *Dynamika pracy elektrolizerów produkujących wodór*. Rynek Energii, 1(122), 2016.
- [8] Kotowicz J., Bartela Ł., Węcel D., Dubiel K.: *Hydrogen generator characteristic for storage of renewably-generated energy*. Energy Vol. 118, 2017, str.156-171.
- [9] Kotowicz J., Węcel D., Jurczyk M.: *Analysis of component operation in Power to Gas to Power operation*, Applied Energy Vol. 216, 2018, str. 45-59.
- [10] Millet P., Grigoriev S.: *Water Electrolysis Technologies. Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety*, chapter 2, 2013, str. 19-41.
- [11] Vincent I., Bessarabov D.: *Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.258>.
- [12] Vincent I., Kruger A., Bessarabov D.: *Development of efficient membrane electrode assembly for low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis*, International Journal of Hydrogen Energy 42, 2017, str. 10752-10761.
- [13] Godula - Jopek A.: *Hydrogen production by electrolysis* with a Foreword by Detlef Stolten, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. Edited by Godula - Jopek A. and Polish Academy of Science.

- [14] Arendarski J.: *Niepewność pomiarów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003.
- [15] Główny Urząd Miar: *Wyrażanie niepewności pomiaru - Przewodnik*.
- [16] Janiczek W. R.: *Metody oceny niepewności pomiarów*. Polska Akademia Nauk Oddział w Katowicach, Katowice - Gliwice, 2008.
- [17] Szydłowski H.: *Niepewności w pomiarach. Międzynarodowe standardy w praktyce*. Wydawnictwo naukowe UAM, Poznań 2001.
- [18] Taylor J. R.: *Wstęp do analizy błędów pomiarowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2012.
- [19] Kotowicz J., Bartela Ł., Skorek-Osikowska A., Janusz - Szymańska K., Chmielniak T., Remiorz L., Iluk T.: *Analiza termodynamiczna i ekonomiczna układu gazowo - parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla oraz membranową separacją ditlenku węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [20] Kotowicz J., Bartela Ł., Skorek-Osikowska A.: *Analizy bloku kogeneracyjnego na parametry nadkrytyczne zintegrowanego z instalacją separacji CO₂*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [21] Kotowicz J., Skorek-Osikowska A., Bartela Ł., Balicki A., Michalski S.: *Technologie Oxy - spalania dla bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem dwutlenku węgla*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [22] Kotowicz J.: *Analiza efektywności wybranych układów z turbiną gazową*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [23] Kotowicz. J.: *Elektrownie gazowo-parowe*. Wydawnictwo Kaprint, Lublin 2008.